

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

André LANGEVIN

Ingénieur E. P. C. I.

1^{re} THÈSE. — UTILISATION DE L'EFFET PIÉZO-ÉLECTRIQUE POUR L'ÉTUDE DES EFFORTS VARIABLES.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le

1942, devant la Commission d'Examen

MM. MAUGUIN	<i>Président.</i>
DEBIERNE	} <i>Assesseurs.</i>
FOCH	



PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

André LANGEVIN

Ingénieur E. P. C. I.

1^{re} THÈSE. — UTILISATION DE L'EFFET PIÉZO-ÉLECTRIQUE POUR L'ÉTUDE DES EFFORTS VARIABLES.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 1942, devant la Commission d'Examen

MM. MAUGUIN *Président.*

DEBIERNE } *Assesseurs.*
FOCH }



PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE

108, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, PARIS VI^e

1942



FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyens honoraires } M. MOLLARD.
C. MAURAIN.
Doyen..... Paul MONTEL, *professeur*, Théorie des fonctions.

<i>Professeurs honoraires</i>	{	Léon BRILLOUIN.	G. BERTRAND.	CARTAN.
		PÉCHARD.	Ch. FABRY.	É. BOREL.
		AUGER.	Léon BERTRAND.	A. COTTON.
		DANGEARD.	WINTREBERT.	J. DRACH.
		LESPIEAU.	DUBOSCQ.	M. GUICHARD.
		VESSIOT.	BOHN.	Mme RAMART-LUCAS.
		PORTIER.	RABAUD.	LABROUSTE.
		LAPICQUE.	CAULLERY.	

PROFESSEURS

Charles PÉREZ	T	Zoologie.	TOUSSAINT	Technique Aéronautique.
L. BLARINGHEM	T	Botanique.	M. CURIE	Physique (P. C. B.).
G. JULIA	T	Analyse supérieure et Algèbre supérieure.	G. RIBAUD	T Hautes températures.
C. MAUGUIN	T	Minéralogie.	CHAZY	T Mécanique rationnelle.
A. DENJOY	T	Géométrie supérieure.	GAULT	Chimie (P. C. B.).
L. LUTAUD	T	Géographie physique et géologie dynamique.	CROZE	Recherches physiques.
G. BRUHAT	T	Physique.	DUPONT	T Théories chimiques.
E. DARMOIS	T	Enseignement de Physique.	VALIRON	T Calcul différentiel et intégral.
A. DEBIERNE	T	Physique générale et Radio-activité.	BARRABÉ	Géologie structurale et géologie appliquée.
A. DUFOUR	T	Physique (P. C. B.).	MILLOT	Biologie animale (P. C. B.).
L. DUNOYER	T	Chimie physique.	F. PERRIN	Théories physiques.
M. JAVILLIER	T	Chimie biologique.	VAVON	T Analyse et mesures chimiques.
Henri VILLAT	T	Mécanique des fluides et applications.	G. DARMOIS	Calcul des Probabilités et Physique-mathématique.
Ch. JACOB	T	Géologie.	CHATTON	T Biologie maritime.
P. PASCAL	T	Chimie générale.	AUBEL	Chimie biologique.
M. FRÉCHET	T	Calcul des Probabilités et Physique mathématique.	Jacques BOURCART.	Géographie physique et Géologie dynamique.
E. ESCLANGON	T	Astronomie.	Mme JOLIOT-CURIE.	Physique générale et Radioactivité.
H. BÉGHIN	T	Mécanique physique et expérimentale.	PLANTEFOL	Biologie végétale (P. C. B.).
FOCH	T	Mécanique expérimentale des fluides.	CABANNES	T Recherches physiques.
PAUTHENIER		Physique (P. C. B.).	GRASSÉ	T Zoologie (Évolution des êtres organisés).
De BROGLIE	T	Théories physiques.	PRÉVOST	Chimie organique.
CHRÉTIEN		Optique appliquée.	BOULIGAND	Mathématiques.
PRENANT	T	Anatomie et histologie comparées.	CHAUDRON	Chimie (P. C. B.).
VILLEY		Mécanique physique et expérimentale.	WYART	Minéralogie.
COMBES	T	Physiologie végétale.	TEISSIER	Zoologie.
GARNIER	T	Application de l'analyse à la Géométrie.	MANGENOT	Biologie végétale (P. C. B.).
PÉRÈS		Mécanique rationnelle.	P. AUGER	Physique.
HACKSPILL	T	Chimie minérale.	MONNIER	Physiologie générale.
			PIVETEAU	Géologie.
			ROCARD	Physique.
			H. CARTAN	Calcul différentiel.

Secrétaire..... A. PACAUD.
Secrétaire honoraire..... D. TOMBECK.

INTRODUCTION

Au cours de ce travail, je cherche d'abord à montrer l'intérêt de l'utilisation de l'effet piézo-électrique direct du quartz pour l'étude des efforts très rapidement variables, en précisant les inconvénients des méthodes antérieurement utilisées.

La méthode que j'ai utilisée, possède les qualités communes à toutes les méthodes mécano-électriques ; parmi celles-ci, une des principales est la souplesse que leur donne l'usage possible d'amplificateurs à lampes.

En plus de la grande fidélité de reproduction des courbes de variation de l'effort que permet l'usage d'une lame de quartz de petite dimension, elle présente une commodité particulière qui réside dans l'ajustement immédiat possible de la sensibilité du montage à l'aide d'un condensateur variable placé en shunt entre les armatures de la lame de quartz.

Certains auteurs ayant mis en doute l'intérêt de l'utilisation du quartz pour des études analogues, j'ai considéré comme indispensable de discuter la précision des mesures faites dans ces conditions. A cette fin, j'ai été conduit à étudier expérimentalement les propriétés piézo-électriques du quartz, sa conductibilité électrique, ainsi que son hystérésis diélectrique.

Comme, pour éviter des insuccès, il est nécessaire d'opérer avec une lame de quartz pure du point de vue cristallographique, j'ai également examiné les avantages et les inconvénients des différentes méthodes dont on dispose pour déceler les régions maclées dans la lame ; cet examen m'a conduit à utiliser la méthode des figures de corrosion artificielles obtenues par attaque de la lame par l'acide fluorhydrique.

Pour prévoir la sensibilité du montage, il est nécessaire de connaître la valeur absolue du module piézo-électrique principal du quartz ; devant les divergences considérables qui existent entre les chiffres donnés par les différents auteurs pour la valeur de ce module, j'ai jugé utile de la mesurer à nouveau en contrôlant soi-

gneusement la pureté des lames utilisées par la méthode des figures de corrosion artificielles.

J'ai réussi à montrer, en outre, que les divergences entre les valeurs trouvées précédemment, provenaient très vraisemblablement de la présence de macles d'importance variable dans les lames utilisées. La valeur admise jusqu'ici pour ce module ($6,45 \cdot 10^{-8}$) est de ce fait trop faible et semble devoir être remplacée par la valeur plus approchée : $7 \cdot 10^{-8}$ c. g. s.

Pour apprécier l'erreur qui était introduite par suite d'une variation de la température, j'ai été conduit à étudier également les variations de la valeur de ce module en fonction de la température, dans des conditions expérimentales favorables ; la plupart des auteurs ayant effectué ces déterminations dans des conditions incompatibles avec de bonnes mesures.

Le champ d'applications possible de la méthode piézo-électrique étant très vaste, j'ai consacré mes efforts à l'appliquer à l'étude de phénomènes, que les autres méthodes, moins commodes ou moins fidèles, ne permettaient pas d'étudier.

Dans cette catégorie se rangent :

1° Dans le domaine des faibles pressions : l'étude de la pression artérielle chez l'homme ;

2° Dans le domaine des pressions moyennes : l'étude des coups de bélier dans les conduites courtes ;

3° Dans le domaine des fortes pressions ou gros efforts : l'étude des pressions des gaz de combustion des explosifs et l'étude des efforts latéraux sur les rails exercés par les essieux des véhicules.

L'application de cette méthode à l'étude des coups de bélier dans les conduites courtes, lorsque la surpression initiale dépasse la pression constante du réservoir a permis l'étude des phénomènes discontinus qui prennent naissance dans ces conditions.

Les tracés obtenus, complétés par l'examen visuel direct à travers un élément de conduite en verre, ont permis l'interprétation physique des phénomènes.

Ces phénomènes peuvent d'ailleurs être prévus théoriquement, au moins dans leurs grandes lignes, grâce à une méthode graphique commode préconisée par M. Bergeron, à condition de faire un certain nombre d'hypothèses simplificatrices qui nuisent à la précision des prévisions.

Enfin pour souligner l'intérêt pratique de l'application de la méthode piézo-électrique, je cite les principaux résultats qu'elle a

permis d'obtenir dans l'étude de la pression artérielle chez l'homme, dans l'étude de la pression des gaz de combustion des poudres et dans l'étude des efforts latéraux des essieux sur les rails.

En débutant, je tiens à rendre hommage à tous ceux qui ont contribué à ce travail, soit par une aide directe, soit par leurs conseils.

Ma reconnaissance va tout d'abord à mon père, P. Langevin, qui a été le promoteur de toutes les applications récentes de la piézo-électricité et qui a dirigé mon travail.

J'adresse un bien amical remerciement à mes collaborateurs, M. Boullé, ingénieur au Service des Eaux de la Ville de Paris, le Dr Gomez, élève et collaborateur du Pr Vaquez et M. Mauzin, ingénieur, inspecteur de la traction au P. O.-Midi.

Je me fais un devoir de rendre hommage à la mémoire de M. Clémentel, directeur de l'Union technique du Bâtiment, qui, ayant compris tout l'intérêt de la méthode piézo-électrique, a permis la réalisation de l'étude des coups de bélier dans les conduites courtes.

Mes remerciements s'adressent également à M. Bergeron, professeur à l'École Centrale, pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux.

Je remercie bien vivement Mlle Moulin et M. Schwob pour l'aide qu'ils ont apportée dans l'étude des propriétés électriques du quartz et M. R. Lucas, pour les conseils précieux qu'il m'a donnés.

J'exprime enfin ma gratitude à Mlle Chamié, M. Tournier et MM. Gondet et P. Beaudouin qui ont bien contribué à faciliter mon travail.

Malgré les travaux exécutés de différents côtés à l'aide de la méthode piézo-électrique ; la liste des applications fécondes de cette méthode n'est pas close et vraisemblablement des applications encore imprévues s'imposeront dans l'avenir. J'espère avoir fait œuvre utile en ayant quelque peu contribué à allonger cette liste.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

CHAPITRE PREMIER

DIFFICULTÉS RENCONTRÉES DANS L'ÉTUDE DES EFFORTS RAPIDEMENT VARIABLES

Résumé historique et critique des solutions proposées

On a réalisé depuis fort longtemps des dispositifs en vue de l'étude des efforts variables, mais ce n'est qu'à l'époque de l'apparition des premières machines à vapeur qu'ils devinrent d'un emploi courant. C'est en effet en 1814 qu'apparaît le premier indicateur pour machine à vapeur, indicateur de Watt, qui a été suivi de toute une série de dispositifs mécaniques analogues.

Les appareils de cette catégorie sont basés sur des méthodes qui peuvent être diverses, mais les premières solutions au problème de l'étude des efforts variables ont toutes un caractère commun, c'est l'utilisation d'un dispositif purement mécanique, déformation d'une pièce élastique engendrant le déplacement d'une partie mobile, utilisé pour la lecture ou l'enregistrement de la grandeur à mesurer.

Par le principe même de leur fonctionnement, ces appareils mettent en jeu une certaine inertie qui limite nécessairement les fréquences qu'ils peuvent suivre ; par exemple, l'indicateur de Watt donne de bons renseignements sur le cycle des machines à vapeur à régime lent, mais il devient incapable de donner des indications précises sur les locomotives modernes à régime rapide.

Pour remédier à cet inconvénient on a cherché à réduire l'inertie du dispositif, autrement dit à augmenter sa fréquence propre, mais alors sa sensibilité décroît très rapidement, ce qui limite les progrès qu'on peut accomplir dans cette voie.

De plus, le déplacement nécessaire au fonctionnement d'un dispositif mécanique interviendra pour modifier plus ou moins le phénomène qu'on veut étudier. Cette perturbation peut, dans certains cas, être telle qu'elle rende impossible l'étude envisagée.

Un exemple d'une telle perturbation est donné par l'étude de la pression artérielle à l'aide d'une capsule manométrique du genre de celles qu'employait Marey ; dans ce cas en effet, la déformation importante que subit la capsule transforme complètement le caractère de l'enregistrement. Au lieu d'enregistrer effectivement les variations de la pression artérielle, on enregistre en fait les variations de volume de l'artère sous l'influence de la pression, grandeur qui dépend, non seulement de la pression qui règne à l'intérieur de l'artère, mais encore de son diamètre et de l'élasticité de sa paroi. En pratique, on ne peut tirer de ces enregistrements aucun renseignement direct sur la loi de variation de la pression artérielle. Ils ne permettent même pas la comparaison des pressions maxima, puisque le diamètre des artères est variable d'un sujet à l'autre.

De grands efforts ont été faits, depuis de nombreuses années pour perfectionner les dispositifs mécaniques en vue de les adapter à l'étude des phénomènes rapidement variables. Nous ne nous étendrons pas sur cette question, puisque l'on trouve un exposé historique complet de l'évolution des appareils mécaniques dans le livre de M. Labarthe (1).

En particulier, l'enregistrement optique des déformations mécaniques a été utilisé ; on réussit ainsi à réduire l'inertie des pièces mobiles tout en augmentant la sensibilité de l'appareil.

Si l'on veut aller plus loin dans cette voie, il faut faire appel à des méthodes purement électriques en passant par l'intermédiaire d'une grandeur électrique, qui, seules, permettent de supprimer presque totalement tout effet d'inertie. Les électrons ont en effet une masse qui peut dans tous les cas être considérée comme négligeable.

L'emploi de ces dernières méthodes est devenu pratique par suite des récents perfectionnements apportés dans la technique des lampes à plusieurs électrodes, qui permettent actuellement de réaliser des amplifications très considérables.

Parmi les méthodes de ce genre, on doit citer particulièrement :

- 1° Les méthodes utilisant une variation de capacité ;
- 2° Les méthodes utilisant une variation de résistance ;
- 3° Les méthodes photo-cathodiques ;
- 4° Les méthodes piézo-électriques.

Nous examinerons successivement ces différentes méthodes et nous indiquerons brièvement les avantages et les inconvénients de chacune d'elles.

1^o Méthodes utilisant une variation de capacité

Parmi ces méthodes, la plus intéressante est celle qui utilise la courbe de résonance d'un circuit oscillant de haute fréquence.

a) *Utilisation de la courbe de résonance d'un circuit oscillant.* — Le principe de cette méthode consiste à coupler faiblement une hétérodyne à haute fréquence *fixe* avec un circuit oscillant très légèrement désaccordé. Ce circuit oscillant possède une capacité séparée en deux parties : la partie principale est fixe et l'autre partie est variable sous l'influence de l'effort à étudier.

Ce dernier condensateur est généralement constitué par un condensateur à air, dont une des armatures est fixe ; l'autre déformable (membrane) est mise en liaison directe avec l'effort variable.

Si la partie fixe de la capacité du circuit oscillant de mesure est réglée à la valeur convenable pour que l'on se trouve placé dans la région ascendante de la courbe de résonance : lorsque l'effort agira sur l'armature déformable, la capacité variable augmentera et l'amplitude des oscillations dans le circuit de mesure augmentera également. L'augmentation de cette amplitude sera maximum si on se trouve réglé en l'absence d'effort dans la région de plus grande pente de la courbe de résonance.

La pente de la courbe de résonance sera d'autant plus grande que la résistance ohmique du circuit de mesure est plus faible.

En effet si nous désignons par E la force électromotrice induite dans le circuit dont l'amplitude reste constante, par R la résistance et par ω la pulsation de résonance, le courant dans le circuit à une amplitude donnée par :

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{C\omega}\right)^2}}$$

la valeur maximum de I aura donc lieu lorsque $C = C_0$, si C_0 représente la capacité qui correspond à la résonance du circuit de mesure, et cette valeur maximum de I sera :

$$I_{\max} = \frac{E}{R} \quad \text{inversement proportionnel à } R.$$

La sensibilité de la méthode sera donc d'autant plus grande que R sera plus faible, mais on est limité pour la valeur à donner à cette sensibilité, par la stabilité en fréquence de l'hétérodyne utilisée. On amplifie et on détecte ensuite la tension haute fréquence

obtenue aux bornes du circuit oscillant de mesure et on l'enregistre finalement à l'aide d'un oscillographe.

Cette méthode est appliquée dans les indicateurs Schnauffer, Linderer et Fieber. En résumé, cette méthode a l'avantage de permettre la réalisation d'appareils très sensibles, mais elle a l'inconvénient de nécessiter l'emploi d'une hétérodyne très stable, donc très onéreuse.

De plus, pour que l'amplitude des variations de capacité reste constante, la membrane qui sert d'électrode déformable doit avoir des dimensions d'autant plus importantes que les variations d'effort seront plus faibles, sa fréquence propre diminuera donc avec l'ordre de grandeur des efforts à étudier. Enfin ces appareils, comme tous les dispositifs à membrane, permettent difficilement l'étude des faibles variations d'effort autour d'une forte valeur moyenne.

b) *Méthode stroboscopique de Villey.* — Par l'utilisation d'une méthode stroboscopique, M. Villey a cherché à éviter l'usage d'un oscillographe nécessitant l'emploi d'un enregistrement photographique en le remplaçant par un simple électromètre à fil.

Par le fait même qu'elle est stroboscopique, la méthode n'est pas générale et ne peut être utilisée que pour l'étude de phénomènes périodiques. Ces restrictions d'emploi mises à part, le principe utilisé est bon et permet d'opérer par méthode de zéro.

L'élément qui sert à la mesure est constitué par un condensateur déformable, du genre condensateur à membrane, il possède une tubulure permettant de faire pénétrer de l'air comprimé entre ses deux armatures. Cette pression constante d'air comprimé, mesurée à l'aide d'un manomètre statique, est réglée jusqu'à ce qu'elle équilibre exactement l'effort instantané à mesurer agissant sur la membrane. Le contrôle de cet équilibre est assuré à l'aide du montage électrométrique suivant :

Le condensateur de mesure et un condensateur fixe mais ajustable, sont montés symétriquement par rapport à un électromètre de contrôle, une des armatures de chacun des condensateurs sont reliées entre elles et soumises à une tension influençante alternative de valeur convenable. Voir le schéma de montage sur la figure 1.

Au préalable, le condensateur ajustable a été réglé de façon que, en l'absence d'effort sur l'élément de mesure, l'électromètre reste au zéro quand on fait agir la tension influençante.

Au cours de la mesure, un contacteur synchrone connecte la tension influençante à un instant déterminé de la période du phé-

nomène à étudier. Si l'équilibre entre l'effort à étudier et la contre-pression d'air comprimé n'est pas réalisé, l'électromètre dévie, on modifie alors la contre-pression pour la ramener au zéro et on lit la pression au manomètre. On peut obtenir ainsi, en décalant chaque fois le contacteur synchrone, la courbe complète de variation de l'effort par points successifs.

En résumé, cette méthode a trois inconvénients principaux :
1° on ne peut l'employer que pour étudier des phénomènes péri-

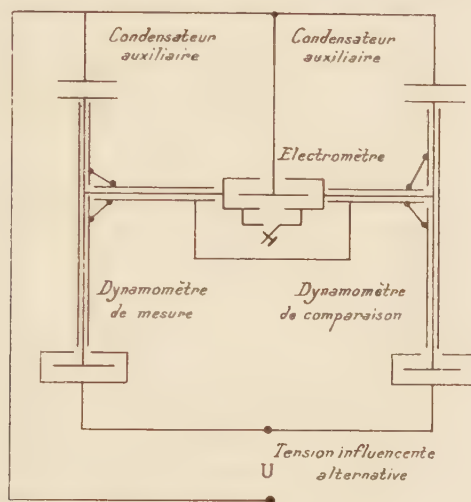


FIG. 1. — Montage de M. Villey

diques ; 2° on ne peut obtenir de résultats convenables que si le phénomène conserve une amplitude constante pendant un temps assez long ; 3° elle exige la réalisation d'un contacteur synchrone.

2° Méthodes utilisant une variation de résistance

Ces méthodes sont toutes basées sur la variation avec la pression de la résistance électrique de rondelles de charbon ou d'aggloméré à base de charbon. On place cet élément sensible, sur lequel agit l'effort à étudier, dans un des bras d'un pont de Wheatstone, constitué par ailleurs avec des résistances constantes. L'oscillographe est placé dans une des diagonales du pont, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un amplificateur ; dans l'autre diagonale, se trouve la batterie d'alimentation, un rhéostat de réglage et un milliampèremètre.

Ces appareils ont l'avantage de la simplicité et permettent une bonne sensibilité tout en possédant une fréquence propre élevée.

Sur ce principe, ont été réalisés un assez grand nombre d'appareils. Parmi ceux-ci, on peut citer : l'indicateur Cossor, le manographe Rumpf, les appareils Martin et Caris, Glaman et Triebnig, Dodds ; ils ne diffèrent entre eux que par des dispositions de détail.

Mais l'inconvénient essentiel de ces genres d'appareils est que la sensibilité de leurs éléments au charbon n'est pas définie. Nos essais, ainsi que ceux de M. Mauzin, à la Compagnie P.-O. ont montré que la sensibilité des éléments au charbon décroît constamment suivant une loi exponentielle en fonction du nombre des efforts appliqués, ce qui ne laisse aucune possibilité de tarage précis.

3^o Méthodes photo-cathodiques

Parmi les méthodes qui utilisent les propriétés des cellules photo-électriques, la plus intéressante est celle de MM. Labarthe et Demontvignier.

Dans cette méthode, l'élément de mesure est une petite membrane métallique plane, qui se déforme sous l'influence de la pression à mesurer. La face interne de cette membrane est mise en contact direct avec le milieu où se produit le phénomène à étudier, tandis que la face extérieure polie optiquement, réfléchit un faisceau de lumière parallèle tombant sur sa partie centrale.

Dans ces conditions, si le faisceau réfléchi tombe sur une cellule photo-électrique à vide, le flux de lumière reçu par la cellule sera, par suite de la déformation de la membrane, inversement proportionnel à la pression à mesurer.

Les variations de courant photo-électrique données par la cellule sont ensuite amplifiées à l'aide d'un montage à penthode et triode du type amplificateur à résistance et capacité de liaison et sont finalement enregistrées photographiquement, grâce à un oscillographe cathodique.

La liaison entre la membrane et l'autre partie du montage est établie uniquement par l'intermédiaire du faisceau lumineux. Ce genre de liaison permet de régler à volonté la distance qui sépare les deux parties de ce dispositif de mesure.

Cette particularité confère à la méthode une commodité d'emploi souvent précieuse. Par exemple, dans l'étude des cycles d'un moteur à explosion, on pourra placer la partie délicate du mon-

tage (cellule, amplificateur à lampes et oscillographe) à une distance du moteur telle qu'elle soit à l'abri des vibrations engendrées par son fonctionnement.

Ces vibrations, généralement de forte amplitude, peuvent en effet, détériorer les organes fragiles du montage ou provoquer des perturbations dans les tracés par suite de la sensibilité microphonique des lampes.

Tout serait parfait, si, comme l'indique M. Labarthe dans son livre (1), la sensibilité de la cellule photo-électrique était constante au cours du temps.

Mais, en fait, la sensibilité d'une cellule à vide est variable ; les cellules photo-électriques actuellement fabriquées vieillissent vite, leur sensibilité décroît appréciablement avec le temps. De plus, elles sont délicates et un éclaircissement accidentel un peu violent suffit à provoquer une chute brusque de sensibilité.

Ces variations de sensibilité entraînent l'obligation de procéder à des étalonnages de contrôle fréquents.

Enfin, nous avons pu montrer, à propos de nos travaux sur les luminescences provoquées par les détonations (2), faits en collaboration avec MM. Muraour et Michel-Lévy, que des cellules, vendues comme cellules à vide, présentaient dans leur fonctionnement des défauts analogues à ceux des cellules à gaz.

En opérant, en particulier, avec une cellule à vide Gecovalve, d'un type employé en télévision, nous avons pu constater que, si la cellule suit fort bien, quelle qu'en soit la rapidité, la partie croissante des variations d'intensité lumineuse, il n'en est plus de même lorsque cette intensité lumineuse décroît.

Il apparaît alors, comme avec les cellules à gaz, un phénomène de traînage tel que le temps mis pour le retour à l'état initial, en l'absence de toute lumière, est de l'ordre du millième de seconde.

Ce phénomène a pu être rendu visible grâce à l'enregistrement avec cette cellule, associée avec un oscillographe Dufour, d'une lueur instantanée provoquée par la rencontre de deux ondes de choc.

Lueur dont nous avons mesuré la durée au préalable, par enregistrement direct sur film photographique monté sur tambour tournant à très grande vitesse (la durée effective ainsi mesurée était 2.10^{-6} seconde).

Nous avons pu constater ainsi, que la loi de décroissance du courant photo-électrique correspond à une loi de recombinaison d'ions. Cette loi peut s'interpréter en admettant, soit que le vide

n'est pas parfait à l'intérieur de l'ampoule constituant l'enceinte de la cellule, soit que le phénomène photo-électrique lui-même fasse intervenir une ionisation interne de la couche sensible.

Si nous désignons par n la concentration des ions à l'instant t , pendant le temps dt , le nombre d'ions recombines dn sera proportionnel à n^2 , donc :

$$dn = -\alpha n^2 dt \quad \text{ou} \quad \frac{dn}{n^2} = -\alpha dt$$

et si nous supposons à l'origine, c'est-à-dire à l'instant de l'éclairement maximum, une ionisation correspondant à n_0 ions par centimètre cube, on obtient en intégrant l'expression précédente de 0 à t :

$$\frac{1}{n} - \frac{1}{n_0} = \alpha t$$

d'où :

$$n = \frac{n_0}{1 + \alpha n_0 \cdot t}$$

mais, à chaque instant, le courant dans la cellule sera proportionnel à la concentration des ions présents dans l'atmosphère interne de la cellule ou dans la couche sensible ; donc si nous désignons par I_0 l'intensité du courant initial et par I le courant à l'instant t :

$$\frac{I_0}{I} = \frac{n_0}{n} = 1 + \alpha \cdot n_0 \cdot t.$$

Le rapport I_0/I varie donc linéairement en fonction du temps si cette hypothèse se vérifie. Voici ce que l'on obtient sur un de nos tracés, pour des points successifs équidistants :

$I_0 = 21,5$ mm	$\frac{I_0}{I_1} = 1,43$
$I_1 = 15$	$\frac{I_0}{I_2} = 1,87$
$I_2 = 11,5$	$\frac{I_0}{I_3} = 2,26$
$I_3 = 9,5$	$\frac{I_0}{I_4} = 2,68$
$I_4 = 8$	$\frac{I_0}{I_5} = 3,06$
$I_5 = 7$	$\frac{I_0}{I_6} = 3,58$
$I_6 = 6$	

en traçant la courbe de variation de ce rapport en fonction du temps, on peut vérifier s'il s'agit bien d'une droite.

Ces résultats sont d'ailleurs en accord avec une théorie des phénomènes photo-électriques due à M. R. Lucas, qui interprète la conductibilité constatée par une ionisation de la couche sensible, même en l'absence d'atmosphère gazeuse dans l'intérieur de la cellule.

4^o Méthodes piézo-électriques

On peut considérer à juste titre, que l'utilisation de l'effet piézo-électrique du quartz permet de réaliser des dispositifs capables de suivre des fréquences très élevées et douées d'une grande fidélité. Cette solution permet donc de remédier à un certain nombre des inconvénients des autres méthodes. Nous développerons plus loin les arguments qui le démontrent.

L'idée d'utiliser le quartz pour de telles mesures n'est pas essentiellement nouvelle, puisque, dès 1912, Galitzine avait réalisé des sismographes piézo-électriques.

En ce qui concerne plus particulièrement la mesure des pressions variables l'idée initiale de l'utilisation du quartz est due à P. Langevin (42), qui l'a employé dès 1917 pour la réception des ondes ultrasonores de 40.000 p. p. s. ; quelques années plus tard J. J. Thomson (3), a proposé en 1919, l'utilisation de la tourmaline pour la mesure des pressions des gaz de combustion des poudres, méthode appliquée à la mesure des pressions dans les canons par A. Keys (4) et par J. C. Karcher (5). Ce dernier utilisait une méthode originale basée sur les propriétés du galvanomètre balistique. Depuis, la méthode a été reprise dans des conditions d'applications différentes, par un grand nombre d'expérimentateurs et dans plusieurs pays différents.

On doit citer en France, MM. Chalvet (6) et Bernard, du Laboratoire central de l'Artillerie navale, qui ont utilisé un montage permettant d'enregistrer directement à l'oscillographe Dufour la tension provoquée aux bornes d'un condensateur à quartz par la pression des gaz de combustion des poudres.

A la demande du Comité Scientifique des Poudres, nous avons, sous la direction de M. P. Langevin, et en collaboration avec MM. Muraour, Biquard, Houet et Aunis (7), réalisé un montage qui a permis l'étude des lois de combustion des poudres. Notre méthode a été reprise ensuite par MM. Anselme et Tercé, au Service technique

de l'armement. Le montage utilisé est un perfectionnement de celui qui a été réalisé par M. Hocard (8) en 1927, pour l'étude des variations de pression dans les canalisations d'eau, montage que nous avons mis en œuvre ensuite, sous la direction de MM. P. Langevin et Clémentel et en collaboration avec M. Boullé (9) pour l'étude des coups de bélier dans les conduites courtes.

Parallèlement, un montage analogue a été mis au point, en Allemagne, par MM. Kluge et Lincke (10) et une réalisation industrielle d'appareil pour l'étude des pressions dans les fusils a été faite par la maison Zeiss-Ikon.

Depuis, nous avons, en collaboration avec le Dr Gomez (11) appliqué cette méthode à l'étude des pressions artérielles chez l'homme ; les enregistrements obtenus ainsi ont pu fournir des renseignements nouveaux qui ont permis une localisation précise des affections du système circulatoire et ont contribué grandement à l'étude de l'hémodynamique. L'appareil médical qui a servi à cette étude a été construit par MM. Gondet et P. Beaudouin.

Auparavant, en collaboration avec MM. Gley et Bugnard (12) nous avons appliqué une méthode analogue à celle qui nous avait permis d'étudier les coups de bélier à la mesure de la pression artérielle, chez le chien ; mais les conditions de l'étude étaient moins favorables qu'avec le piézographe ; puisqu'on était alors obligé de sectionner l'artère pour introduire la canule en T.

De plus, sous la direction de M. Mauzin (13) inspecteur de la traction à la Compagnie P.-O.-Midi, cette méthode a été appliquée à l'étude des efforts latéraux des essieux sur les rails et a ainsi permis le repérage continu des défauts des rails le long des voies.

Enfin, une méthode analogue a été appliquée par MM. Gondet et P. Beaudouin (14) à la mesure des accélérations dans les mouvements vibratoires ; cet appareil a permis en particulier, de contribuer à l'étude si importante des vibrations des ailes d'avions en cours de vol.

Le seul énoncé de la liste des principales applications de la méthode piézo-électrique à l'étude des efforts variables suffit déjà à montrer son intérêt ; mais, comme elle n'a pas échappé à la critique nous pensons qu'il ne sera pas inutile de bien dégager ses qualités et de discuter la précision des mesures qu'elle permet.

Bien que les phénomènes piézo-électriques soient très connus aujourd'hui, il ne sera peut-être pas superflu d'en rappeler le principe et d'énoncer les lois qui les régissent.

Nous montrerons ensuite comment des critiques fort peu justifiées ont pu être faites de l'utilisation du quartz, par méconnaissance des qualités électriques ou mécaniques de ce cristal.

Nous exposerons ensuite les résultats principaux que cette méthode nous a permis d'obtenir dans l'étude des coups de bélier dans les conduites courtes, particulièrement lorsque la surpression dépasse la pression de régime de la conduite. Cet exposé sera suivi de l'application à ce cas de la méthode graphique de M. Bergeron, méthode qui permet de prévoir avec une précision satisfaisante, le tracé des courbes de surpression obtenues. Dans une partie théorique, nous montrerons que les résultats de cette méthode graphique sont bien conformes à ce que l'on peut prévoir par le calcul.

Nous dirons ensuite quelques mots des principaux résultats que le piézographe a permis d'obtenir dans l'étude de la pression artérielle humaine.

Enfin, nous indiquerons brièvement les services qu'a pu rendre l'application de cette même méthode aux mesures des efforts qui agissent sur le matériel ferroviaire au cours de la marche des trains.

CHAPITRE II

PIÉZO-ÉLECTRICITÉ

Historique

C'est à la suite des travaux de Becquerel en 1828 et de Gauguin en 1856 sur la pyro-électricité de certains cristaux que Pierre et Jacques Curie, jugeant l'interprétation de ces phénomènes insuffisante, ont été conduits à les étudier de nouveau.

Après une étude très complète de la symétrie qui les ont amenés à énoncer le principe de symétrie, les frères Curie ont pu montrer que la cause de l'apparition de la pyro-électricité devait être recherchée dans la dissymétrie de structure des cristaux.

Ces considérations ont ensuite permis à Pierre Curie de prévoir à l'avance un phénomène nouveau, la piézo-électricité, consistant en l'apparition de charges électriques sur les faces des cristaux dépourvus de centre de symétrie sous l'influence d'une compression ; charges dues au phénomène de polarisation du diélectrique.

Ces prévisions se sont confirmées expérimentalement par la suite dans presque tous les cas (20 cas sur 21).

La vérification expérimentale principale a été faite sur le quartz, taillé en lames.

1^o Piézo-électricité du quartz

Le choix de Curie pour la vérification expérimentale du phénomène prévu s'est porté sur le quartz. Le quartz est en effet parmi les cristaux qui pouvaient convenir, celui qui possède les propriétés optiques, électriques et mécaniques les plus intéressantes ; il possède en effet une rigidité mécanique considérable et constitue un excellent diélectrique à la seule condition d'éviter l'humidité en surface.

Les cristaux de quartz correspondent à une hémiedrie holoaxe du système rhomboédrique et possède de ce fait un axe de symétrie

ternaire (axe optique) et trois axes de symétrie binaire (axes électriques). Ils se présentent, au moins théoriquement, sous forme de prisme hexagonal surmonté de deux pyramides (voir fig. 2).

Les axes électriques sont tous trois perpendiculaires à l'axe optique et font toujours entre eux des angles de 120° . Contrairement à ce qui se passe pour l'axe optique, les deux extrémités d'un des axes électriques ne jouissent pas des mêmes propriétés, il en résulte que si nous inversons le sens d'un des axes électriques, par exemple par rotation d'une partie du cristal de 60° autour de l'axe optique, l'effet piézo-électrique sera également inversé.

Si nous considérons maintenant une section du cristal par un plan AEC perpendiculaire à l'axe optique OO' , on obtient une section hexagonale. Les trois bissectrices des angles en A, E et C sont les axes binaires appelés par Curie, axes électriques (fig. 2 bis).

Taillons dans le cristal une lame à faces parallèles, dont les deux faces principales sont perpendiculaires à l'un des axes électriques et

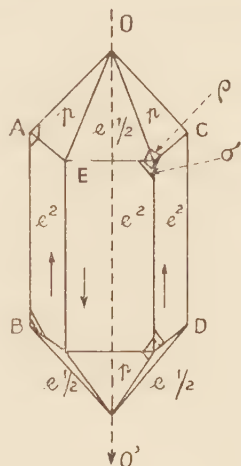


FIG. 2. — Cristal de quartz

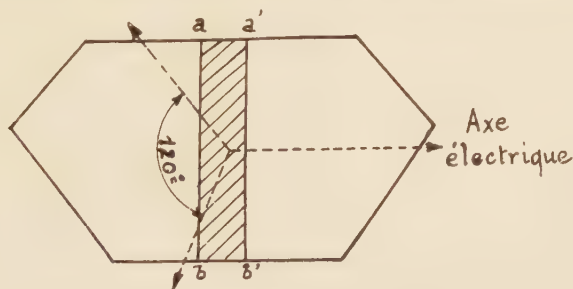


FIG. 2 bis. — Taille d'une lame de quartz

deux autres parallèles à l'axe optique. Chacune des faces principales étant recouvertes d'armatures conductrices, si nous exerçons un effort sur la lame dans une direction convenable, nous constaterons, dans le cristal, la production d'une polarisation électrique, qui se traduira par l'apparition de charges électriques de signes contraires

sur les armatures. Cette apparition de charge se fait suivant les lois de Curie (15) :

1° La compression de la lame suivant l'axe optique ne donne lieu à aucun phénomène électrique ;

2° Quelle que soit la direction de la pression appliquée au cristal la polarisation est toujours normale à l'axe optique ;

3° Lorsque l'effort est dirigé suivant l'axe électrique, la quantité d'électricité obtenue est proportionnelle à l'effort F suivant la relation :

$$Q = \delta . F \quad (1)$$

δ étant le module piézo-électrique principal du quartz ;

4° Lorsque l'effort est à la fois perpendiculaire à l'axe optique et à l'axe électrique (cas des lames de Curie) la quantité d'électricité qui apparaît sur les électrodes est alors :

$$Q = \frac{\delta . L}{e} F \quad (2)$$

où L représente la longueur de la lame suivant la direction normale à la fois à l'axe électrique et à l'axe optique et e l'épaisseur de la lame suivant la direction de l'axe électrique δ est la même constante que précédemment.

Dans ce dernier cas, la différence de potentiel qui résulte de l'action de l'effort F sera, en désignant par K le pouvoir inducteur spécifique du quartz et par C_0 la somme des valeurs de la capacité placée en shunt sur le quartz et de la capacité des connections :

$$U = \frac{4 \pi . \delta . L . F}{K/L + 4 . \pi . e C_0} \quad (3)$$

l représentant la dimension de la lame dans la direction de l'axe optique. Dans le cas général les relations (1) et (2) doivent être complétées en tenant compte du fait que la charge des armatures peut être modifiée par une variation de potentiel qu'on leur impose ; c'est-à-dire que pour un condensateur à diélectrique piézo-électrique, la charge totale est fonction de deux variables indépendantes, la force appliquée F et le potentiel U . Le terme complémentaire à ajouter aux relations (1) et (2) sera :

$$(C + C_0) U$$

d'où la relation générale :

$$Q = \text{Constante} . \delta . F + (C + C_0) U \quad (4)$$

Théorie de Voigt

Quelques années après la découverte de la piézo-électricité, par P. Curie, un physicien allemand Voigt (16) publia une théorie complète des propriétés piézo-électriques des cristaux.

En supposant que la force qui agit sur le cristal a une direction quelconque autre que celle de l'axe optique, Voigt a montré qu'on peut trouver une relation entre la polarisation électrostatique du milieu et les composantes de la force qui agit.

Lorsqu'il s'agit de déformations purement élastiques, la théorie de l'élasticité permet d'écrire que les composantes de pression sont des fonctions linéaires des quotients différentiels qui représentent les déformations.

Si en déformation élastique un point d'abscisse x se déplace de u suivant l'axe des x , la variation relative d'épaisseur, ou dilatation, s'exprimera par :

$$x, \quad \frac{\partial u}{\partial x} = \text{dilatation suivant l'axe des } x,$$

on aurait de même

$$y_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \text{et} \quad z_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$

mais le déplacement dans le sens de l'axe des x varie également d'un point du cristal à l'autre en se déplaçant dans toutes les directions. On exprime ces déformations de cisaillement par les expressions :

$$y_x = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \quad z_x = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}, \quad x_z = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

et Voigt obtient ainsi la relation suivante entre les composantes X_x , Y_y , Z_z , Y_z , Z_x , X_y de la force qui agit et ces divers quotients différentiels : étant donnée l'anisotropie du milieu, on doit introduire un grand nombre de coefficients différents C :

$$\begin{aligned} -X_x &= C_{11} \cdot x_x + C_{12} \cdot y_y + C_{13} \cdot z_z + C_{14} \cdot y_z + C_{15} \cdot z_x + C_{16} \cdot x_y \\ -Y_y &= C_{21} \cdot x_x + C_{22} \cdot y_y + C_{23} \cdot z_z + C_{24} \cdot y_z + C_{25} \cdot z_x + C_{26} \cdot x_y \\ -Z_z &= C_{31} \cdot x_x + C_{32} \cdot y_y + C_{33} \cdot z_z + C_{34} \cdot y_z + C_{35} \cdot z_x + C_{36} \cdot x_y \\ -Y_z &= C_{41} \cdot x_x + C_{42} \cdot y_y + C_{43} \cdot z_z + C_{44} \cdot y_z + C_{45} \cdot z_x + C_{46} \cdot x_y \\ -Z_x &= C_{51} \cdot x_x + C_{52} \cdot y_y + C_{53} \cdot z_z + C_{54} \cdot y_z + C_{55} \cdot z_x + C_{56} \cdot x_y \\ -X_y &= C_{61} \cdot x_x + C_{62} \cdot y_y + C_{63} \cdot z_z + C_{64} \cdot y_z + C_{65} \cdot z_x + C_{66} \cdot x_y \end{aligned}$$

Réciproquement, les composantes des déformations x_x , y_y , z_z , y_z ,

z_z, x_y peuvent s'exprimer en fonction des composantes de l'effort connaissant les différents modules d'élasticité S :

$$\begin{aligned} -x_x &= S_{11} X_x + S_{12} Y_y + S_{13} Z_z + S_{14} Y_z + S_{15} Z_x + S_{16} X_y \\ -y_y &= S_{21} X_x + S_{22} Y_y + S_{23} Z_z + S_{24} Y_z + S_{25} Z_x + S_{26} X_y \\ -z_z &= S_{31} X_x + S_{32} Y_y + S_{33} Z_z + S_{34} Y_z + S_{35} Z_x + S_{36} X_y \\ -y_z &= S_{41} X_x + S_{42} Y_y + S_{43} Z_z + S_{44} Y_z + S_{45} Z_x + S_{46} X_y \\ -z_x &= S_{51} X_x + S_{52} Y_y + S_{53} Z_z + S_{54} Y_z + S_{55} Z_x + S_{56} X_y \\ -x_y &= S_{61} X_x + S_{62} Y_y + S_{63} Z_z + S_{64} Y_z + S_{65} Z_x + S_{66} X_y \end{aligned}$$

Dans ces expressions, on a toujours

$$C_{mn} = C_{nm} \quad \text{et} \quad S_{mn} = S_{nm}$$

ces relations sont entièrement générales, mais les relations particulières supplémentaires caractérisent le type de symétrie dans le milieu cristallin considéré.

Pour le quartz, en choisissant l'axe optique, l'axe des Z, les tableaux des relations d'élasticité se simplifient et on a :

$$\begin{aligned} -X_x &= C_{11} x_x + C_{12} y_y + C_{13} z_z + C_{14} y_z \\ -Y_y &= \quad \quad + C_{11} y_y + C_{13} z_z - C_{14} y_z \\ -Z_z &= \quad \quad \quad + C_{33} z_z \\ -Y_z &= \quad \quad \quad + C_{44} y_z \\ -Z_x &= \quad \quad \quad + C_{44} z_x + C_{14} x_y \\ -X_y &= \quad \quad \quad + C_{66} x_y \\ -x_x &= S_{11} X_x + S_{12} Y_y + S_{13} Z_z + S_{14} Y_z \\ -y_y &= \quad \quad S_{11} Y_y + S_{13} Z_z - S_{14} Y_z \\ -z_z &= \quad \quad \quad S_{33} Z_z \\ -y_z &= \quad \quad \quad S_{44} Y \\ -z_x &= \quad \quad \quad + S_{44} Z_x + 2 S_{14} X_y \\ -x_y &= \quad \quad \quad S_{66} X_y \end{aligned}$$

dans ces tableaux :

$$C_{66} = 1/2 (C_{11} - C_{12}) \quad \text{et} \quad S_{66} = 2 (S_{11} - S_{12})$$

Pour le quartz on a :

$$\begin{array}{ll} C_{11} = 85,46 \cdot 10^{10} \text{ Dyne:cm}^2 & S_{11} = + 12,95 \cdot 10^{-13} \text{ cm}^2\text{:Dyne} \\ C_{33} = 105,62 \cdot 10^{10} & S_{33} = + 9,88 \cdot 10^{-13} \\ C_{44} = 57,12 \cdot 10^{10} & S_{44} = + 20,05 \cdot 10^{-13} \\ C_{12} = 7,25 \cdot 10^{10} & S_{12} = - 1,69 \cdot 10^{-13} \\ C_{13} = 14,35 \cdot 10^{10} & S_{13} = - 1,54 \cdot 10^{-13} \\ C_{14} = 16,82 \cdot 10^{10} & S_{14} = - 3,81 \cdot 10^{-13} \end{array}$$

L'effet piézo-électrique direct correspond à la polarisation électrique du milieu, qui est liée directement aux déformations du cristal. Si l'on désigne par P la polarisation, on a, en général :

$$\begin{cases} P_x = E_{11} x_x + E_{12} y_y + E_{13} z_z + E_{14} y_z + E_{15} z_x + E_{16} x_y \\ P_y = E_{21} x_x + E_{22} y_y + E_{23} z_z + E_{24} y_z + E_{25} z_x + E_{26} x_y \\ P_z = E_{31} x_x + E_{32} y_y + E_{33} z_z + E_{34} y_z + E_{35} z_x + E_{36} x_y \end{cases}$$

Dans le cas du cristal de quartz, les constantes se simplifient :

$$\begin{array}{cccccc} e_{11} & = & e_{11} & 0 & e_{14} & 0 & 0 \\ 0 & & 0 & 0 & 0 & -e_{14} & -e_{11} \\ 0 & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

avec les valeurs numériques suivantes :

$$e_{11} = 4,77 \cdot 10^4 \quad \text{et} \quad e_{14} = 1,23 \cdot 10^4$$

et la relation générale devient :

$$\begin{cases} P_x = e_{11} x_x - e_{14} y_y + e_{14} y_z \\ P_y = -e_{14} z_x - e_{11} x_y \end{cases}$$

On a d'une façon analogue pour l'effet piézo-électrique inverse du quartz :

$$\begin{cases} x_x = \delta_{11} \cdot E_x \\ y_y = \delta_{11} \cdot E_x \\ y_z = \delta_{14} \cdot E_x \end{cases} \quad \begin{cases} z_x = -\delta_{14} \cdot E_y \\ x_y = -2 \delta_{11} \cdot E_y \end{cases}$$

avec

$$\delta_{11} = 6,36 \cdot 10^{-8} \quad \text{et} \quad \delta_{14} = 1,69 \cdot 10^{-8}$$

on retrouve ainsi les lois de Curie.

CHAPITRE III

CONTROLE DES PROPRIÉTÉS DES LAMES DE QUARTZ

1^o *Propriétés mécaniques*

Avant d'utiliser une lame de quartz, il est nécessaire de contrôler ses différentes propriétés, il faut tout d'abord se rendre compte si elle résistera à l'effort qu'on lui transmettra.

a) *Résistance à la compression.* — Les différents auteurs ne sont pas d'accord sur la valeur de la résistance du quartz à la compression. En particulier, on trouve dans les tables de constantes, le chiffre de 10 kilos par millimètre carré, alors que M. Chalvet (6) obtient dans ses expériences une valeur supérieure à 60 kilos par millimètre carré.

Les divergences constatées sont la conséquence de la difficulté de la mesure. Cette difficulté provient du fait que le quartz est très rigide, mais très cassant. Il suffit que la pièce qui transmet l'effort au quartz n'épouse pas exactement la forme de la surface du quartz, pour qu'en certains points apparaissent des efforts énormes qui provoquent des amorces de fissures. Ces fissures se propagent ensuite dans toute la lame et amènent sa rupture complète pour une compression moyenne relativement très faible. La valeur à adopter pratiquement sera donc variable et dépendra de la façon dont la pièce qui transmet l'effort est ajustée sur la lame de quartz, bien que la valeur la plus exacte soit certainement la valeur la plus élevée, c'est-à-dire le chiffre de M. Chalvet. Pour effectuer correctement cette mesure, il est nécessaire que l'effort soit uniformément réparti sur toute la surface du quartz, ce résultat peut être obtenu de façon satisfaisante soit en rodant le quartz sur la pièce qui transmet l'effort, soit en interposant entre eux une lame de métal plastique (plomb ou étain). M. Mauzin qui a utilisé cette dernière méthode, trouve un ordre de grandeur comparable au chiffre de

M. Chalvet ; ses résultats montrent que la résistance pratique du quartz est supérieure à 30 kilos par millimètre carré.

b) *Plasticité du quartz.* — Certains auteurs ayant parlé de plasticité du quartz, il était important de vérifier si l'on pouvait déceler un tel phénomène et de se rendre compte de son importance pratique. M. Chalvet a fait des mesures qui ont montré qu'aucune plasticité ne se manifestait pratiquement même pour des pressions de l'ordre de 50 kilos par millimètre carré.

2^o *Propriétés électriques*

A) *Piézo-électricité.*

CONTROLE DE LA VALEUR DU MODULE PIÉZO-ÉLECTRIQUE

a) *Détermination des régions macrées.* — Si l'on veut éviter un échec possible, il est nécessaire avant de monter une lame de quartz de contrôler ses qualités piézo-électriques. Ce contrôle est indispensable si l'on veut pouvoir changer de lame sans modification de la sensibilité de l'appareil.

Pour qu'une lame de quartz possède une valeur moyenne normale du module piézo-électrique, il est nécessaire qu'elle soit taillée dans un cristal pur. Il faudra donc s'assurer sur la lame brute de l'absence de toute macle non microscopique.

A cet effet, en dehors de l'examen optique classique (fait à l'aide d'un appareil de Norremberg ou à l'aide d'un microscope polarisant), méthode qui permet de déceler les macles optiques ou association de cristaux ayant des propriétés optiques différentes, il est nécessaire de recourir à d'autres méthodes permettant de déceler les associations de cristaux à axes électriques opposés. Ces dernières macles sont très gênantes, parce qu'elles fournissent des charges de signe contraire aux charges que donne le cristal principal.

Pour les mettre en évidence, on peut utiliser plusieurs méthodes, dont nous discuterons les avantages et les inconvénients.

Une première méthode due à Cady consiste à comparer la lame qu'on veut étudier à une lame étalon considérée comme parfaitement pure. L'inconvénient de cette méthode est fondamental, elle ne fait que déplacer le problème ; la difficulté reste entière pour reconnaître si la lame étalon est pure. De plus, même si l'on disposait d'une lame étalon effectivement pure, on ne pourrait en fait que

constater l'anomalie, mais on n'aura aucun moyen de localiser les macles qui en sont la cause ; donc, on ne pourra pas tailler une lame pure à partir d'une lame brute.

Pour pouvoir obtenir une détermination géométrique précise des parties maclées, on dispose de deux méthodes pratiques :

La première de ces deux méthodes due à M. P. Langevin, et utilisée industriellement depuis plusieurs années, pour le contrôle

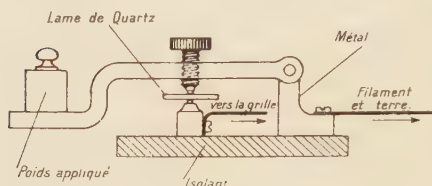


FIG. 3. — Presse à levier pour le contrôle des lames de quartz

des lames de quartz destinées à la construction des émetteurs ultrasonores, consiste à vérifier point par point la charge obtenue par effet piézo-électrique direct. Dans ce but, la lame à étudier est placée entre les deux mâchoires d'une petite presse

à levier. Les mâchoires de la presse sont terminées par deux calottes hémisphériques (billes d'acier encastrées dans le métal des mâchoires).

Un des leviers porte un plateau, en plaçant un poids P sur ce plateau, on peut exercer un effort connu en un point défini de la lame (voir fig. 3). En déplaçant la lame par rapport aux mâchoires, on peut réaliser l'exploration de toute la lame par petites surfaces successives.

Les quantités d'électricité obtenues aux divers points sont mesurées à l'aide d'un montage électrométrique à lampe, le schéma du montage étant le suivant :

On relie la mâchoire inférieure isolée du sol à la grille de la lampe, alors que la mâchoire supérieure est connectée au filament et au sol. Un milliampèremètre est placé dans le circuit plaque (voir fig. 4). Lorsque la face inférieure de la lame Q se charge négativement par suite de l'application de l'effort en un point, le courant plaque diminue proportionnellement à la quantité d'électricité libérée. On peut explorer ainsi une grande partie de la surface de la lame et déterminer les régions qui donnent des quantités d'électricité trop faibles ou de signe variable, régions qui correspondent aux parties maclées de la lame. Ces régions

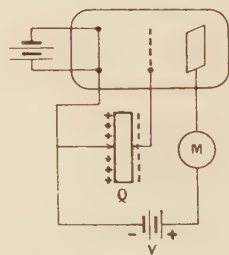


FIG. 4.

Schéma du montage utilisé pour le contrôle des lames de quartz.

doivent être éliminées au moment de la taille définitive.

Industriellement, on se contente d'éliminer les régions donnant des quantités d'électricité nettement trop faibles ou de signe variable. Il est évident que cette façon de procéder ne sera pas suffisante si on veut obtenir une lame tout à fait pure, puisqu'on laissera ainsi subsister des macles de petites dimensions, très fréquentes dans les cristaux de quartz.

Les inconvénients de cette méthode sont donc les suivants :

1^o Le dessin des parties maclées d'une lame étant généralement très compliqué, comme on procède à l'examen par très petites surfaces, il est nécessaire de faire un très grand nombre de déterminations, pour avoir un tracé à peu près exact des régions maclées ;

2^o A cause de la difficulté de repérage de la position du point qui vient d'être examiné, il reste une certaine incertitude sur la position de ce point ;

3^o Si l'on veut que l'examen de la lame soit complet et précis, il faut exercer l'effort sur une surface de très petite dimension et comme le montage électrométrique employé n'est pas très sensible, cela conduit à exercer une pression très considérable sur la partie intéressée de la lame. Cette forte pression a pour effet de fissurer plus ou moins la lame, ce qui détériore localement le réseau cristallin et produit des amorces de rupture (ces fissures invisibles dans les conditions habituelles deviennent visibles lorsqu'on attaque la lame à l'acide fluorhydrique).

Méthodes des figures de corrosion artificielles. — La deuxième de ces méthodes, plus sûre et plus pratique, consiste dans l'examen des figures de corrosion artificielles de la lame à étudier ; le principe de cette méthode est dû à Daniell (17), qui l'a utilisée dès 1816 pour l'étude minéralogique des cristaux naturels ; elle a été ensuite employée par Descloizeaux (18) pour des études cristallographiques. Enfin, plus récemment, M. Arsandaux (19) et l'abbé Gaudefroy (41) l'ont appliquée à l'examen complet d'un cristal de quartz par sciage multiple ; la méthode consiste alors à scier le cristal en lames perpendiculaires à l'axe électrique et à les attaquer ensuite à l'acide fluorhydrique pendant deux ou trois heures. Après attaque, on constate, comme le dit Le Châtelier (20) dans son livre sur la silice, que la présence des différents individus cristallins est nettement mise en évidence. Les stries parallèles creusées par cette attaque, sont orientées différemment d'un individu à l'autre et produisent ainsi sur la surface de la lame des moirés qui s'éclairent inégalement.

ment suivant l'orientation de la source lumineuse, les macles apparaissent tantôt en blanc sur fond gris ou en gris sur fond blanc. On n'a plus ensuite qu'à tourner successivement toutes les lames ainsi que l'on ferait des feuillets d'un livre, pour observer d'une lame à la suivante, la variation de la surface d'intersection des divers individus cristallins avec les plans de coupe. On peut ainsi se faire une représentation dans l'espace du volume occupé par chacune des macles et déterminer avec certitude, pour chaque lame les limites exactes des parties saines et des parties macleées.

J'ai utilisé cette méthode pour la vérification de toutes les lames que j'ai utilisées pour mes mesures et pour l'équipement de mes appareils.

b) *Détermination de la valeur absolue du module piézo-électrique du quartz.* — Si l'on veut prévoir à l'avance la quantité d'électricité mise en jeu par un effort déterminé, il est nécessaire de connaître la valeur absolue du module piézo-électrique du quartz.

Si l'on examine dans ce but les valeurs données pour ce module par les différents auteurs, on arrive à la conclusion que le module piézo-électrique est une grandeur variable d'un échantillon à l'autre.

En effet, les chiffres donnés oscillent entre $4,94 \cdot 10^{-8}$ et $7,18 \cdot 10^{-8}$ C. G. S., ce qui représente une variation de plus de 20 %.

Voici d'ailleurs le tableau des principaux chiffres obtenus :

Auteurs	Date	$\delta_{11} \cdot 10^8$	$\delta_{14} \cdot 10^8$	Méthode
J. et P. Curie	1889	6,32		directe
P. Czermak	1887	6,26		—
Voigt	1892	6,45	1,45	—
Pockels	1894	6,27	1,92	—
		6,18	2,09	—
Nachtikal	1899	6,54		—
J. Curie	1910	6,90		—
Hayashi	1912	6,31		—
Röntgen	1913	6,95		—
Dawson	1927	4,94		—
		à 7,18		—
Ny Tsi Sé	1929	6,40		inverse
Gunther	1932	6,27		—
Fox et Fink	1934	5,50		—
		à 6,50		—
Hosterberg	1935	6,22	2,24	directe
Clay et Karper	1937	6,80		—
Andréeff	1929	6,51		indirecte
Nussbaumer	1932	6,84		—
Knol	1932	6,84		—
Dye	1926	6,78		—
		6,30		—

Ces divergences paraissent assez curieuses étant donné que les autres constantes physiques du quartz sont beaucoup mieux définies. Par exemple les constantes optiques et mécaniques se trouvent être mesurées avec des divergences de l'ordre du dix-millième. De plus, on a toutes les raisons de penser que, pour des cristaux véritablement purs, dont les réseaux présentent une régularité absolue, toutes les propriétés physiques doivent rester constantes d'un échantillon à l'autre.

Je me suis donc proposé de rechercher la cause de ces divergences, non pas dans la voie d'erreurs expérimentales accidentelles, hypothèse à rejeter *a priori*, étant donnée la qualité incontestée de la plupart de ces auteurs, mais plutôt dans le sens d'une mauvaise qualité possible des lames de quartz qui ont servi aux mesures. Cette dernière hypothèse n'a rien d'invraisemblable, si l'on considère que les lames de quartz sont habituellement fournies aux laboratoires par des opticiens spécialisés. Ceux-ci ne contrôlaient en fait leurs lames que par les méthodes optiques ; il était donc vraisemblable qu'il puisse subsister dans les lames utilisées des associations de cristaux à axes optiques parallèles (association constituée par des cristaux de pouvoir rotatoire de même sens), macles intervenant pour diminuer la valeur du module.

Dans le cas où cette dernière hypothèse se vérifierait, je me suis proposé de déterminer, sur des lames contrôlées par la méthode des figures de corrosion artificielles, la valeur réelle du module piézo-électrique du quartz.

Grâce à la collaboration de Mlle Chamié, de l'Institut du Radium, j'ai pu avoir entre les mains les lames de Curie, remontant probablement à l'époque où Curie a fait ses mesures, et nous avons mesuré à nouveau la valeur qu'elles donnent pour le module, par une méthode directe que nous décrirons plus loin.

Nous avons pu ensuite montrer que les lames qui donnaient des valeurs très faibles pour le module présentaient des macles visibles, par la méthode des figures de corrosion artificielles. Nous avons ensuite déterminé sur des lames aussi pures que possible la valeur absolue du module.

Avant de faire ces mesures, j'ai pris la précaution de contrôler mon montage de mesure par comparaison directe de mes résultats avec les chiffres obtenus avec les mêmes lames par Mlle Chamié à l'Institut du Radium. Cette comparaison permettait effectivement le contrôle puisque Mlle Chamié opérait par une méthode différente

basée sur la constance d'un courant d'ionisation fourni par une source radioactive étalon.

Méthode de mesure du module. La méthode que j'ai utilisée est une méthode de zéro. Les charges fournies par la lame de quartz à étudier sont compensées en agissant par influence sur un condensateur étalon (étalon de coefficient d'influence, du type Moulin).

Au cours d'une détermination, on applique sur la lame de Curie à étudier l'effort correspondant à un poids connu P et on réalise la compensation des charges obtenues en réglant la valeur du potentiel appliqué au condensateur étalon à l'aide d'un montage potentiométrique.

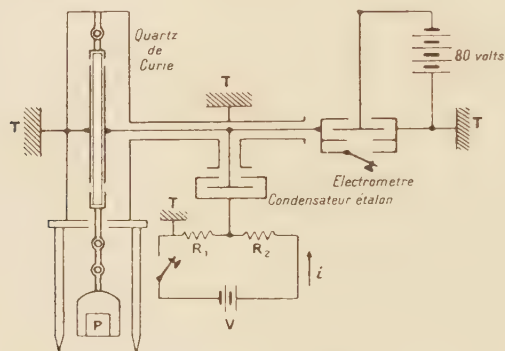


FIG. 5. — Montage utilisé pour la mesure de la valeur absolue du module piézoélectrique du quartz

trique. Ce montage potentiométrique était constitué par deux boîtes de résistance étalonnées, alimentées par une source de f. e. m. connue.

L'appareil utilisé pour le contrôle de la compensation des charges était un électromètre Curie-Debierne monté en hétérostatique, la tension mise sur l'aiguille étant de 80 volts (voir le schéma, fig. 5).

La marche d'une mesure était la suivante : l'électromètre étant préalablement réglé, on isole une des paires de quadrants, à l'aide de la clef 1, on règle ensuite la boîte de résistance R_1 à la valeur convenable pour que l'électromètre reste au zéro lorsqu'on ferme la clef 2 et que l'on place simultanément le poids P sur le plateau de la lame de quartz à étudier. La résistance R_2 a pour but de limiter l'intensité débitée par la source de tension V , cette tension ne pouvant rester effectivement constante que si l'intensité du

courant débité reste assez faible ; dans nos mesures V avait pour valeur 4 ou 8 volts.

Résultats du contrôle de la méthode. — Nos mesures de comparaison ont porté sur des lames de diverses provenances.

1° Lames du Laboratoire Curie de l'Institut du Radium ;

2° Lames des différents laboratoires de l'École de Physique et Chimie ;

3° Lames de Curie de la Maison Beaudouin.

Les résultats obtenus sont les suivants :

N° des lames inscrit sur le support	Longueur utile en cm	Valeurs trouvées		Chiffres de Mlle Chamié	
		Q. par kg	$\delta \times 10^8$	Q. par kg en U. E. S.	$\delta \cdot 10^8$
Lames anciennes du laboratoire Curie	14	5,50	6,67	5,377	6,54
	15	9,20	10,024	10,04	6,70
	26	8,75	6,92	9,38	6,90
	34	4,18	3,75	3,822	5,77
	53	7,50	8,75		
	60	12,10	14,30	14,17	6,875
	61	12,00	13,81	14,02	6,80
	62	12,10	13,78	13,64	6,86
	73	5,90	6,15	6,15	7,025

On voit que, dans l'ensemble, malgré que les chiffres aient été obtenus par deux méthodes différentes, les résultats sont assez concordants. La lame n° 34 qui, donnait une valeur apparente du module vraiment faible a été démontée et examinée par la méthode des figures de corrosion artificielle, une grosse macle à l'une des extrémités de la lame a été mise ainsi en évidence ; cette lame qui avait été fendue au cours du démontage a été tout de même retaillée de façon à supprimer la partie visiblement maclée. En mesurant ensuite à nouveau son module, j'ai trouvé, malgré la fissure :

$$Q = 4,635 \text{ U. E. S., C. G. S., d'où } \delta = 6,83 \cdot 10^{-8}$$

ce qui montre que la plus grande partie de l'anomalie de valeur du module était bien due à la présence de cette grosse macle.

Valeur du module obtenue avec des lames non maclées. — Il restait à déterminer sur des lames ne présentant aucune macle visible avec des moyens d'investigation actuels, la valeur la plus rapprochée possible du module du quartz.

Les lames non maclées que j'ai étudiées se classent en deux catégories : les unes ont été examinées avant la taille définitive par

moi, tandis que les autres, qui m'ont été confiées par M. Tournier, ont été contrôlées et taillées sous sa direction aux Laboratoires L. M. T. Ces dernières lames sont taillées avec une grande précision ; les résultats obtenus sont les suivants :

Nature de la lame	Longueur utile en cm	Epaisseur en cm	Quantité d'électricité par kg	$10^8 \times \delta$
Contrôlée par mes soins...	5,40	0,12	2,90	7,10
	4,90	0,045	7,57	7,10
Contrôlée sous la direction de M. Tournier	5,37	0,10	3,70	7,01
	5,35	0,10	3,675	7,007
	5,40	0,10	3,70	6,995
	5,375	0,10	3,717	7,065

Il semble donc qu'on doive en conclure qu'une lame non maclée possède une valeur du module légèrement supérieure à $7 \cdot 10^{-8}$ c. g. s. et que cette valeur reste constante en passant d'une lame à l'autre. On pourra donc changer la lame d'un dispositif sans modifier sa sensibilité à condition de contrôler l'absence de toute macle.

c) *Variation du module piézo-électrique avec la température.* — Une autre question importante se pose dans la discussion de la précision des mesures d'effort avec un appareil à quartz ; la constante piézo-électrique varie-t-elle avec la température et dans l'affirmative, quelle est la loi de variation réelle ?

De nombreux travaux ont eu pour but d'éclaircir cette question. Les principaux sont ceux de Kamerlingh Onnès et Mme Beckmann (21), A. Perrier (22), Dawson (23), Pitt et Mac Kinley (24), Klay et Karper qui employaient tous une méthode électrométrique directe dans des conditions plus ou moins favorables, ainsi que ceux de Andréeff, Frédéricksz et Kasarnowsky (26) et de Frédéricksz et Michailow (27) qui utilisaient une méthode indirecte basée sur l'étude de la résonance de la lame étudiée. La valeur du module était calculée par la formule suivante tirée des travaux de Vigoureux (28) et de Kobzarew (29) relation donnant la valeur du module en fonction de l'amortissement du quartz φ_2 , de la résistance équivalente du quartz R_q et du module d'élasticité S_{11} :

$$\delta = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{\varphi_2 S_{11} X}{R_q \omega Y Z}} \text{ (cm, amp., ohm, sec.)}.$$

Dans cette formule ω représente la fréquence propre de la lame de quartz de XYZ, les dimensions du quartz suivant trois axes rectangulaires (OZ direction de l'axe optique, OY direction de propagation des ondes élastiques et OX la direction de l'un des axes électriques). Pour la mesure des efforts variables, le plus logique serait de tenir compte des résultats obtenus par les méthodes directes, même si des phénomènes parasites interviennent. Malheureusement, ces résultats ne concordent pas entre eux ; par exemple, des divergences importantes existent même pour le sens de la variation entre les résultats de Dawson et ceux de Perrier.

Dawson trouve que le module commence par augmenter jusqu'à 60° puis décroît ensuite, tandis que les résultats de Perrier montrent que le module reste sensiblement constant jusqu'à 200° pour décroître ensuite. Ces dernières déterminations semblent plus en accord avec les idées de Curie, qui affirmait, dans la notice qui accompagnait les quartz de Curie, que la constante piézo-électrique du quartz n'est modifiée ni par le temps ni par la température.

Etude critique des montages utilisés. — Devant ces résultats contradictoires, il nous a paru indispensable de rechercher quelles pouvaient être les causes d'erreurs qui intervenaient et de mettre ensuite en évidence les phénomènes parasites qui contribuaient à fausser les mesures. Ce programme exigeait de procéder à un examen critique du montage utilisé et de refaire moi-même les mesures avec un montage possédant les mêmes défauts. Si je retrouvais ainsi les mêmes résultats, il serait démontré que les divergences provenaient d'une cause d'erreur systématique et non pas d'une erreur accidentelle. Les mêmes mesures devaient ensuite être reprises avec un montage exempt des mêmes défauts.

C'est ainsi qu'après avoir examiné le montage utilisé par Dawson, qui nous paraissait le plus défectueux (en particulier à cause de la transmission de l'effort au quartz par l'intermédiaire d'une pointe), nous avons entrepris de reprendre ces mesures avec un montage analogue. Nous avons réalisé un montage très simple, en supprimant toutefois la transmission de l'effort par pointe, méthode particulièrement défectueuse pour l'étude des variations du module avec la température. Il est en effet évident que le coefficient d'élasticité du quartz étant variable avec la température, la pointe pénètre d'autant plus à l'intérieur de la lame que la température est plus élevée ; la distribution des efforts à l'intérieur de la lame sera de ce fait variable avec la température, ce qui faussera nécessairement

la mesure par l'intervention variable des autres modules du quartz.

Mon premier montage a été réalisé sans aucune précaution spéciale. Pour des raisons de commodité d'isolement électrique, j'utilisais des lames de quartz accolées par la base, par l'intermédiaire d'une lame métallique mince servant d'électrode isolée par les lames de quartz elles-mêmes. L'effort est transmis au quartz par une lame métallique épaisse et plane. L'ensemble quartz-

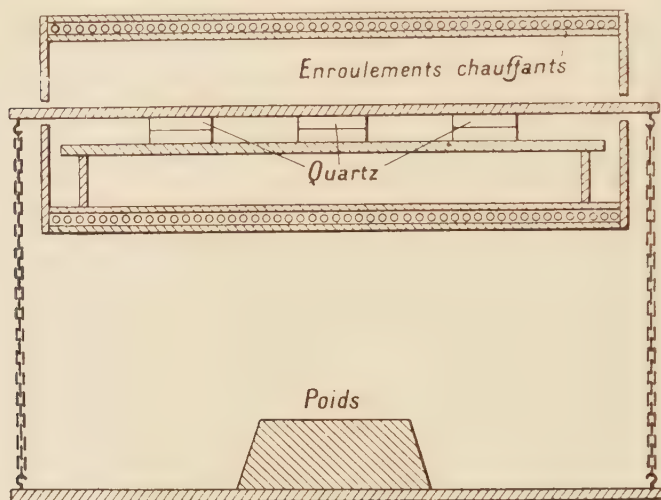


FIG. 6. — Dispositif préliminaire pour l'étude de la variation du module du quartz en fonction de la température

électrode et lame est placé dans un four dont les dimensions sont suffisantes pour que la température puisse être considérée comme uniforme dans la région où sont placés les quartz. Le poids destiné à exercer un effort invariable sur les quartz est placé sur un plateau relié par des chaînes à la lame métallique plane (voir fig. 6).

Dans ces conditions, le montage est si défectueux et les résultats si irréguliers, qu'on ne peut affirmer qu'il y a variation du module, ni affirmer l'absence de variations.

Pensant qu'il s'agissait essentiellement d'une répartition anormale des efforts à l'intérieur de la lame, répartition variable avec la température, nous avons fait l'expérience suivante pour en acquérir la certitude, en opérant à température constante : les quartz sont

chargés de manière permanente par un poids fixe auquel on ajoute une surcharge pour la mesure, on lit alors la tension à appliquer sur un condensateur étalon pour équilibrer la charge fournie par l'application de la surcharge, la méthode employée et le montage électrométrique étant les mêmes que lors de la mesure de la valeur du module des lames.

Puis, dans les expériences successives, on change la valeur de la charge permanente en laissant constante la surcharge appliquée. Cela permet de contrôler la mauvaise répartition des efforts, si la valeur apparente du module est fonction de l'effort permanent appliqué aux quartz.

On doit noter qu'en utilisant une méthode de zéro, on obtient des résultats indépendants des variations possibles de capacité du condensateur piézo-électrique, variations qui peuvent se produire si les pièces métalliques qui transmettent l'effort ne s'appliquent pas rigoureusement sur la surface du quartz, ce qui est le cas en général. J'ai obtenu les résultats suivants :

Charge permanente appliquée	Tension de compensation pour une surcharge de 1 kg	Tension de compensation pour une surcharge de 2 kg
1 kg	70 divisions	139,75 divisions
1,5 —	75 —	146 —
2 —	75 —	148,50 —
3 —	65,25 —	128,25 —
3,5 —	—	120 —
4 —	49 —	108 —
5 —	36 —	101 —
6 —	34 —	68,25 —
7 —	34,71 —	74,25 —
8 —	34 —	84 —
10 —	—	70,50 —

Les lectures de la tension de compensation sont faites au volt-mètre, sensibilité 150 divisions pour 7,5 volts. Voir figure 7 la courbe correspondante. Cette variation apparente du module en fonction de la charge appliquée en permanence ne peut pas s'interpréter par une déformation permanente du quartz, on doit donc admettre nécessairement que, pour les faibles charges, l'effort n'était pas appliqué normalement à la surface du quartz. S'il en est ainsi, la distribution des efforts est variable avec la charge appliquée en permanence, à température constante et variable avec la température à effort constant. La figure 8 illustre les cas pratiques de mauvaise répartition des efforts.

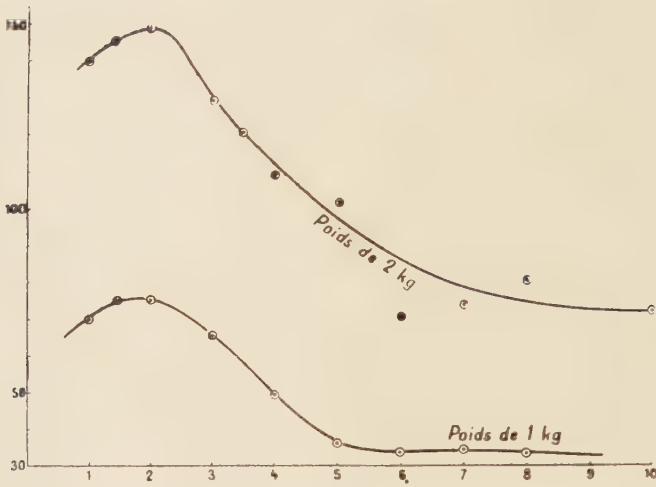


FIG. 7

Variation apparente du module en fonction de la charge appliquée, dénotant une mauvaise répartition des efforts dans la lame.

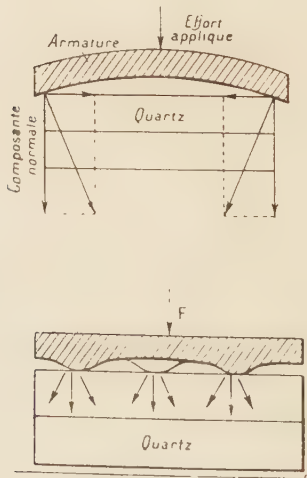


FIG. 8

Exemples de mauvaises répartitions des efforts dans les lames.

- 1° Cas où l'armature est concave
- 2° Cas général où l'armature porte en trois points.

Pour contrôler mon point de vue, j'ai disposé entre le quartz et la pièce métallique qui transmet l'effort, une lame de caoutchouc qui permet à coup sûr de répartir uniformément la pression sur toute la surface du cristal.

On obtient dans ces nouvelles conditions des résultats beaucoup plus réguliers, montrant l'indépendance de la quantité d'électricité obtenue de la valeur de la charge permanente, même pour une charge inférieure à 1 kilo. On a les chiffres suivants :

Charge permanente appliquée	Tension de compensation pour une surcharge de 2 kg
1 kg	70,50 divisions
2	70,25 —
3 —	70,40 —
4 —	70 —
5	70,20 —
6	71 —
7 —	70,50 —

Mais le caoutchouc ne pouvant supporter une élévation de température suffisante, nous avons cherché à le remplacer par une lame de métal plastique comme l'étain ou le plomb ; malheureusement dans ces conditions, il faut encore une charge permanente de 7 kilos environ pour obtenir une répartition uniforme des efforts et il était fort peu pratique d'opérer dans ces conditions.

Malgré ces difficultés, nous avons tenu à faire quelques déterminations dans ces conditions ; pour pouvoir mettre en évidence les défauts de la méthode employée par Dawson, j'ai fait les déterminations par deux procédés :

1^o Méthode de déviation analogue à celle de Dawson ;

2^o Méthode de zéro (compensation des charges).

Les résultats obtenus, avec une surcharge de 800 grammes environ sont les suivants :

Température en degrés C	Méthode de zéro Tension de compensation	Méthode de déviation Déviation en mm
13 ^o 5	1,444 volt	150
20 ^o	1,440 —	172
60 ^o	1,430 —	201
120 ^o	1,365 —	...
160 ^o	1,340 —	130
168 ^o	1,320 —	128,5

En examinant les courbes correspondantes données figure 9, on constate que les résultats obtenus par les deux méthodes sont nettement divergents.

La méthode de déviation fournit des résultats tout à fait analogues à ceux de Dawson, puisque le module croît jusqu'aux environs de 60° pour décroître ensuite, alors que la méthode de zéro, plus précise, indique que la valeur du module décroît constamment lorsque la température croît suivant une loi sensiblement linéaire.

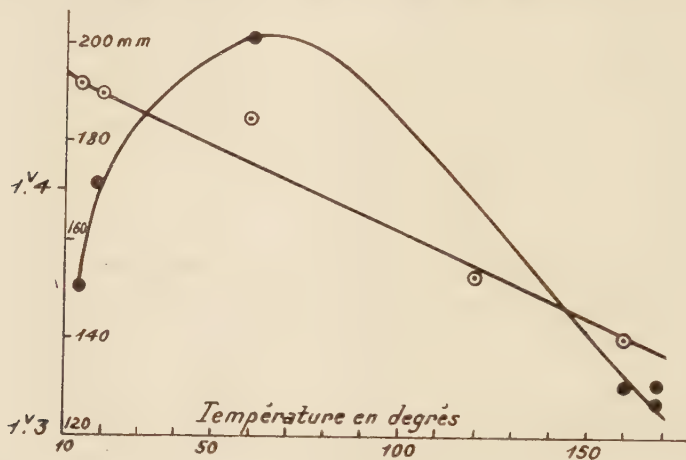


FIG. 9. — Courbe de variation du module en fonction de la température

- Résultats avec méthode de zéro ;
- Résultats avec méthode de déviation.

Ces divergences s'interprètent facilement si l'on admet que la déformation des pièces qui transmettent l'effort au quartz provoquent une petite variation de capacité, cette variation de capacité augmente d'abord avec la température à effort appliqué égal, puis cesse d'augmenter à partir du moment où la déformation devient telle que la lame métallique porte sur toute la surface du quartz ; la décroissance de cet effet parasite s'explique par le seul effet de la température qui rend le métal plus malléable.

Ces variations de capacité ne peuvent fausser les mesures que si on utilise une méthode de déviation, ce qui explique l'absence de maximum dans la courbe obtenue par méthode de zéro.

Détermination de la loi exacte de variation avec un quartz de Curie.

— Pour étudier de manière plus précise la loi de variation du module

avec la température, nous avons jugé bien préférable d'utiliser un quartz de Curie ; l'effort est appliqué sur la lame elle-même par traction directe, ce qui élimine tous les problèmes de répartition d'effort et de déformation d'armatures sous l'influence de l'effort.

Le montage est celui du quartz de Curie habituel, toutefois il est indispensable de remplacer les armatures de papier d'étain par une couche de graphite, le contact étant pris ensuite sur le graphite à l'aide de lame de clinquant de cuivre rouge de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur. De même, on doit remplacer les isolants en ambre par des pièces en silice fondue.

L'appareil, muni de sa protection électrostatique, est placé à l'intérieur d'un four électrique vertical monté sur pieds, en calorifugeant le mieux possible l'ensemble. Comme la lame de quartz utilisée est de petites dimensions par rapport à celles du four, et placée en son centre, on peut admettre que la température de toute la lame est bien uniforme au moment de la mesure. On attend pour chaque détermination que l'équilibre de température soit atteint dans la région où se trouve le quartz, cet équilibre n'est atteint qu'au bout de plusieurs heures. On laisse refroidir complètement la lame, très fréquemment, de façon à pouvoir vérifier que rien n'est modifié à froid. Les dimensions du quartz sont 70, 15 et 1,2 mm, il est monté sur des supports articulés à la cardan, le poids appliqué est de 100 grammes. Les déterminations sont faites par méthode de zéro, avec le montage précédemment utilisé. On peut ainsi faire des déterminations convenables entre la température ordinaire et $+ 200^{\circ}$, température que l'on ne peut pas dépasser pratiquement, car à partir de cette température la conductibilité électrique du quartz devient incompatible avec une bonne précision dans les mesures (1).

Nous avons étudié cette conductibilité et vérifié sa variation suivant une loi exponentielle (30). Il était nécessaire de compléter ces mesures par l'étude du module à des températures inférieures à la température ordinaire. A cette fin, nous avons supprimé du montage le four électrique, il est remplacé par une cuvette spéciale, constituée par deux manchons cylindriques coaxiaux soudés sur un fond plan, entourant le couvercle cylindrique du quartz et servant à contenir le mélange réfrigérant convenable.

(1) Comme cette conductibilité électrique augmente suivant une loi exponentielle en fonction de la température, on est en droit de se demander comment les auteurs cités ont pu obtenir des valeurs du module pour des températures de l'ordre de 500° .

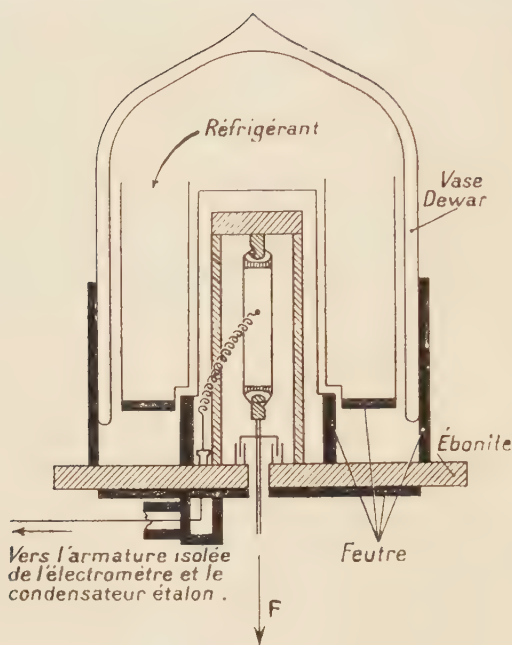


FIG. 10

Disposition de la lame de Curie dans l'étude des variations du module vers les basses températures.

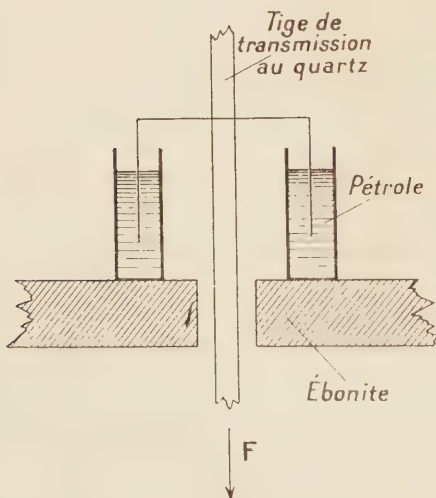


FIG. 11

Dispositif permettant de transmettre sans frottement appréciable l'effort à la lame de quartz et assurant l'étanchéité.

Cette cuvette est complètement coiffée par un vase Dewar de gros diamètre, qui vient calorifuger la plus grande partie de la surface de l'appareil; le reste de la surface est calorifugé en remplaçant le plateau de métal qui supporte la chambre métallique contenant le quartz par un plateau en ébonite épais garni de feutre (voir fig. 10). Mais il était nécessaire de laisser un trou pour le passage de la tige qui transmet l'effort au quartz; pour éviter que l'humidité ne se renouvelle par ce trou et ne vienne se condenser sur le quartz et les isolants, nous avons utilisé le dispositif suivant :

Sur la tige de transmission de l'effort au quartz et à l'intérieur de la chambre où est disposée la lame, est soudée une coupelle cylindrique en laiton, de façon que

son axe coïncide avec celui de la tige ; la partie cylindrique de cette coupelle pénètre à l'intérieur d'un vase composé de deux cylindres concentriques soudés sur une rondelle plane, sans en toucher le fond. Ce vase étant rempli d'un liquide incongelable à la température à laquelle on veut opérer, on réalise ainsi un dispositif qui permet une transmission intégrale de l'effort au quartz tout en réalisant une étanchéité parfaite. Voir le schéma de réalisation, figure 11.

En calorifugeant également la borne de sortie isolée de l'appareil, on peut, en desséchant l'atmosphère interne, éviter les condensations de vapeur d'eau, et conserver, même pour des températures inférieures à 0° un excellent isolement. Ces précautions nous ont permis de mesurer avec une précision en valeur relative de l'ordre du millième la variation du module du quartz avec la température entre 200° et — 60°. La précision sur la valeur absolue est beaucoup moins grande mais cela est peu important. Nous n'avons pas été au delà de — 60°, parce que, pour des températures plus basses, malgré les précautions prises, la température n'est plus suffisamment uniforme, ce qui provoque des tensions internes et des fluctuations qui viennent fausser les mesures, et rend les lectures impossibles. Les résultats pour tout le domaine de température étudié sont les suivants :

Température en degrés C	Méthode de zéro Tension de compensation	Courant de fuite en mm par minute
60°	138,5	Négligeable
48°	141,1	—
30°	142,7	—
28°7	143	—
26°	143,2	—
17°5	144,1	—
13°	145,3	—
11°	145	—
7°	145,9	—
5°5	146	—
1°	146,8	—
4°	147	—
10°	147	—
15°5	146,9	—
19°	146,2	—
20°	146	1
30°	145,8	—
40°	144,5	—
50°	144	—
60°	143	—
65°	142,45	—
70°	141,95	2
75°	141,4	—

Température en degrés C	Méthode de zéro Tension de compensation	Courant de fuite en mm par minute
80°	141	Négligeable
85°	140,2	
90°	139,7	
105°	138,7	
110°	138,45	
115°	137,7	
+ 120°	136,7	3,5
140°	135,4	
+ 150°	134,5	4
160°	133,7	6
170°	133,2	
180°	132,7	30
+ 198°	131,4	
200°	131,2	60

Les divisions marquées dans la colonne des tensions de compensation se rapportent à la sensibilité 3 volts du voltmètre, 150 divisions pour 3 volts. Le poids appliqué était pour toutes ces mesures un poids de 100 grammes. Le courant de fuite dû à la conductibilité du quartz a varié en fonction de la température entre 10^{-4} U. E. S. C. G. S.

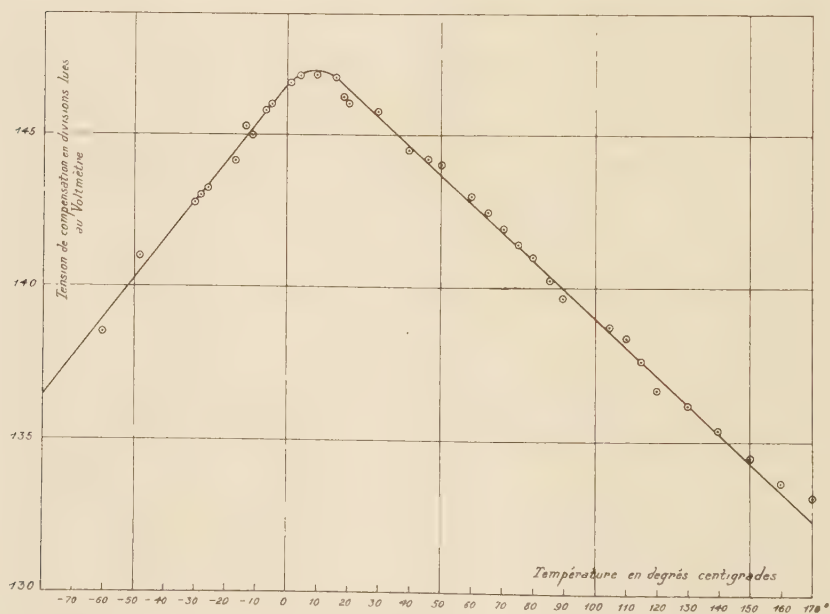


FIG. 12. — Courbe complète des variations du module piézoélectrique du quartz entre -60° et $+200^{\circ}$ C

par minute et 6.10^{-8} U. E. S. par centimètre carré. Voir la courbe des valeurs du module figure 12. Ces résultats montrent que le module piézo-électrique du quartz passe par un maximum autour de la température ordinaire ; vers les hautes températures, la variation est sensiblement linéaire entre 20 et 200° et égale à 10,5 %. Vers les basses températures, cette variation est également linéaire entre 0° et — 60° ; dans cet intervalle de température, la variation du module est de 5,7 %. On voit donc que le module du quartz varie relativement peu avec la température ; autour de la température ordinaire, la variation est pratiquement nulle ; en dehors de cette zone, la loi de variation est parfaitement définie et on pourra calculer le terme de correction à apporter aux mesures faites à des températures plus élevées ou plus basses que la température ordinaire.

B) Propriétés diélectriques du quartz.

1° Conductibilité. — La conductibilité du quartz a été déjà étudiée en particulier par Radmanèche (31) et Rahimi (43) qui ont vérifié la loi de variation en fonction de la température suivant

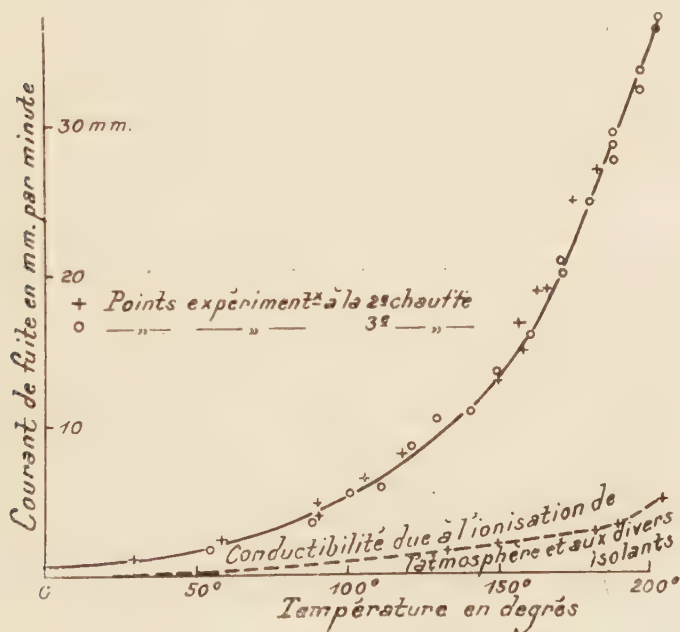


FIG. 13. — Loi de variation de la conductibilité du quartz suivant l'axe électrique en fonction de la température

une loi exponentielle dans un très grand intervalle de température.

Nous avons vérifié nous-même que ces résultats étaient valables dans le cas d'une lame taillée perpendiculairement à l'axe électrique ; pour supprimer l'influence de la conductibilité en surface, on opère avec une lame de grandes dimensions latérales et de 1,2 mm d'épaisseur avec au centre une petite électrode de 1 cm².

L'électrode isolée reliée à l'électromètre est chargée d'une quantité d'électricité connue, obtenue par influence sur le condensateur d'étalon. On mesure alors la quantité d'électricité disparue en une minute. Les résultats obtenus sont les suivants :

Température en degrés C	Courant de fuite en mm par minute	
26°	1,225	
30°	1,30	
60°	1,80	
89°	3,50	
101°5	5,50	
111°	6	
118°5	8	
121°	8,60	
130°5	10,30	
141°	11	
150°	14	
160°	16,30	
166°	19	
172°	20,50	
176°	23	
180°	25	
184°5	27	
190°	29	
200°	32	
205°	36,50	

Quantité d'électricité
perdue

1 mm correspond à
8,4. 10⁻⁴ U. E. S.
par minute

La courbe de variation correspondante est donnée figure 13, si on prend les logarithmes, on constate que l'on obtient une droite la loi de variation de la conductibilité avec la température est donc bien exponentielle et il s'agit donc bien d'une conductibilité en volume. Pour se rendre compte de la part de conductibilité due aux autres isolants du montage, nous avons remplacé le quartz par une lame d'air équivalente, leur importance est très faible comme on peut s'en rendre compte sur la figure 13.

2° *Hystérésis diélectrique du quartz.* — Certains auteurs ont parlé d'un phénomène d'hystérésis diélectrique important présenté par le quartz, qui pourrait être gênant pour l'étude des efforts variables. M. Villey (32) indique même que l'importance des résidus diélec-

triques du quartz serait telle qu'elle rendrait pratiquement impossible toute utilisation du quartz comme dynamomètre.

Comme aucun chiffre précis, à notre connaissance, n'accompagne cet exposé, nous avons jugé indispensable de faire des mesures électrométriques pour déterminer l'importance réelle de ces résidus diélectriques du quartz ou charges résiduelles.

La méthode utilisée consiste à charger un condensateur à lame de quartz piézo-électrique sous une tension connue, puis à le mettre en court-circuit pendant un temps déterminé. On étudie ensuite les

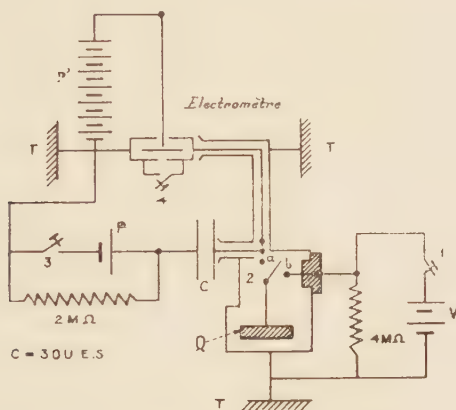


FIG. 14. Montage électrométrique pour l'étude des charges résiduelles du quartz

charges qui apparaissent sur son armature isolée, cela permet d'opérer dans les mêmes conditions de tension appliquée sur le condensateur à quartz qu'au cours de nos mesures d'effort variable.

La mesure des charges résiduelles se fait à l'aide d'un électromètre Curie-Debierne monté en hétérostatique. L'étude de la déviation de cet électromètre en fonction du temps permet de suivre le développement des charges résiduelles.

La figure 14 représente le montage électrométrique utilisé. La lame de quartz qu'on veut étudier, est placée dans une enceinte métallique fermée pour éviter tout effet d'influence parasite externe sur ses armatures. L'armature isolée du quartz est reliée aux quadrants isolables de l'électromètre par l'intermédiaire de la position a d'une clef 2 à deux directions ; la position b de cette même clef permet de charger le condensateur à quartz à l'aide d'une pile V .

Entre le plot *b* et la terre, une résistance de 4 mégohms fixe, lorsque la clef 1 est ouverte, le potentiel de *b*.

A l'intérieur de l'électromètre, une clef 4 commandée par un relai permet, à volonté, d'isoler l'une de l'autre les deux paires de quadrants ou de les porter au même potentiel. C'est par l'intermédiaire de cette dernière clef que le condensateur à quartz peut être mis en court-circuit. Enfin la sensibilité du montage aux charges peut être déterminée en chargeant par influence le condensateur étalon C (30 U. E. S.) grâce à la pile P et à la clef 3.

Marche d'une mesure. — La clef 2 étant sur la position *b*, on charge le condensateur à quartz en manœuvrant la clef 1. Au bout d'un temps connu, on décharge le quartz en faisant passer la clef 2 sur le plot *a*, la clef 4 étant toujours restée fermée pendant ces manœuvres ; au bout d'un temps donné de court-circuit, on isole, grâce à la clef 4, le conducteur isolable de l'électromètre et on suit la déviation de l'aiguille.

Résultats expérimentaux. — Pour pouvoir mesurer les charges résiduelles provenant de la lame de quartz, il faut éliminer celles qui proviennent des autres isolants du montage. A cet effet, nous avons opéré en deux temps ; dans une première mesure on obtient les charges fournies par l'ensemble des isolants et on répète la même mesure en supprimant la lame de quartz.

Comme temps d'application de la tension *V* sur le quartz, nous avons choisi 1 seconde, temps relativement très long par rapport au temps d'application des efforts que nous avons étudiés. La valeur de la tension *V* à appliquer au quartz a été choisie égale à la valeur maximum de la tension produite entre les armatures des lames sous l'influence de l'effort à étudier, c'est-à-dire 12,3 volts. Avant d'effectuer les mesures, nous avons déterminé la sensibilité du montage, en chargeant le condensateur étalon C sous une différence de potentiel connue de 2,05 volts. La charge ainsi développée est de 0,205 U. E. S. ou $6,83 \cdot 10^{-11}$ coulombs, la déviation correspondante de l'électromètre est de 26 cm ; la sensibilité du montage est donc de 1 cm pour $2,62 \cdot 10^{-12}$ coulomb.

Le quartz utilisé a une surface d'environ 50 cm² et une épaisseur de 0,165 cm. Il est taillé perpendiculairement à un axe électrique. On doit noter que le volume de cette lame est de beaucoup supérieur à celui des lames utilisées dans nos appareils.

1^o *Mesure avec la lame.* — $V = 12,3$ volts.

Durée du court-circuit : 30 secondes.

Temps en minutes	Déviatiou de l'électromètre
0	0
1	5,40 cm
2	8,30
3	9,80
4	10,85
5	11,55
7	12,70
10	13,45
15	14,10
25	14,70
40	15,25
100	12,35

La déviation maximum est donc atteinte au bout de 40 minutes seulement et les charges résiduelles totales développées sont alors de $4 \cdot 10^{-11}$ coulombs. On remarquera la lenteur avec laquelle ces charges apparaissent et leur faible importance ; si l'on compare cette quantité d'électricité avec celle que donne une tension de 12 volts aux bornes de la lame utilisée pour les mesures d'effort variable et qui est de $6 \cdot 10^{-8}$ coulombs, on voit qu'elle est pratiquement négligeable.

D'ailleurs, si l'on veut évaluer les charges dues au quartz lui-même, il faut retrancher de ce chiffre les charges dues aux autres diélectriques présents dans le montage. A cette fin nous avons fait les mesures suivantes.

2^o Mesures sans lames de quartz. — $V = 12,3$ volts.

Le montage, identique au précédent, mais dans lequel le quartz a été retiré présente une nouvelle sensibilité qui est déterminée comme précédemment. On obtient alors une déviation de 1 cm pour $2,27 \cdot 10^{-12}$ coulombs. La tension de charge V est toujours appliquée pendant une seconde. — Durée du court-circuit : 30 secondes.

Temps en minutes	Déviatiou de l'électromètre
0	0
1	4,40 cm
2	5,60
3	8,35
5	10,85
7	12,00
10	14,15
30	15,15
45	15,85
65	16,50
75	16,50
90	16,30

La déviation maxima correspond à une quantité d'électricité dégagée de $3,75 \cdot 10^{-11}$ coulombs. Si donc on retranche cette charge de la quantité d'électricité obtenue par l'expérience précédente, on obtient pour les charges résiduelles dues au quartz lui-même la valeur maxima de $2,5 \cdot 10^{-12}$ coulombs.

On constate donc que les charges résiduelles données par le quartz sont beaucoup plus faibles que celles que fournit l'ambre.

Nous avons complété cette étude par l'examen de la variation qu'introduit une modification du temps du court-circuit. On constate expérimentalement que le temps de court-circuit n'intervient pratiquement pas sur la valeur maxima de la charge résiduelle ; étant donnée la lenteur avec laquelle les charges apparaissent, ce résultat n'a rien de surprenant. Par contre, cette charge varie très sensiblement avec la tension appliquée. En appliquant sur le même montage une tension de 160 volts, la quantité maxima d'électricité obtenue devient, avec la lame de quartz de l'ordre de 10^{-10} coulombs, et sans lame de quartz, de $9 \cdot 10^{-11}$, ce qui montre que les charges résiduelles fournies par le quartz augmentent dans le même rapport que celles qui sont fournies par l'ambre.

Si l'on considère que l'utilisation du quartz n'est intéressante que pour l'étude d'efforts au moins un peu rapidement variables, on voit que ce phénomène parasite ne pourra en aucun cas introduire de cause d'erreur tant soit peu appréciable, dans les conditions où nous utilisons les lames de quartz.

CHAPITRE IV

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES EFFORTS VARIABLES AU MOYEN D'UNE LAME DE QUARTZ PIÉZO-ÉLECTRIQUE

I. — *Principe de la méthode utilisée*

La méthode que nous avons utilisée pour la mesure des variations rapides d'efforts présente sur les méthodes qui l'ont précédée l'avantage d'utiliser un dispositif ne présentant plus qu'une inertie mécanique négligeable. De plus, par la souplesse du réglage de sa sensibilité, le même dispositif permet d'étudier les variations d'efforts de natures et d'amplitudes très diverses.

Le procédé employé consiste à appliquer à la mesure des variations d'efforts, les propriétés piézo-électriques d'une lame de quartz. L'effort à étudier agit directement sur la lame de quartz ; cette lame est employée dans les conditions que nous avons indiquées précédemment ; l'effort est, soit perpendiculaire à l'axe électrique et à l'axe optique, soit dans la direction de l'axe électrique. Nous examinerons plus loin les considérations qui déterminent le choix de la disposition à adopter.

Il résulte de l'effort qui agit sur le quartz d'après l'équation (3) une différence de potentiel qui lui sera proportionnelle sans aucun retard. On pourra observer cette différence de potentiel entre les armatures métalliques de la lame de quartz.

Étant donné le faible ordre de grandeur du module piézo-électrique, il sera nécessaire d'amplifier ces variations de potentiel ; il conviendra d'utiliser un montage amplificateur à lampes triodes qui, en particulier, n'introduise pas de distorsion ; de plus, il est nécessaire que les charges électriques fournies par le quartz en quantités bien déterminées suivant l'équation (4), soient conservées intégralement par la grille de la lampe d'entrée.

A la sortie de l'amplificateur, les variations de courants sont enregistrées par l'intermédiaire d'un oscillographe, dont la fré-

quence propre est suffisamment grande pour pouvoir suivre fidèlement les variations d'efforts à étudier.

Dans ces conditions, on obtient une déviation instantanée de l'oscillographe proportionnelle à la valeur de l'effort qui agit sur le quartz au même instant.

II. — Dispositif employé

I. *Transmission de l'effort au quartz.* — Dans les appareils que nous avons employés, l'effort variable à étudier agit toujours aussi directement que possible sur la lame de quartz. En pratique pour éviter de compromettre l'isolement du condensateur à quartz et pour être à l'abri des effets d'influence parasites, il est généralement nécessaire d'utiliser un dispositif de transmission.

Ce dispositif de transmission était constitué dans nos appareils, soit par une lame métallique élastique (lame plane ou lame amincie sur la périphérie), soit, dans le cas de gros efforts par un piston cylindrique en acier trempé, coulissant à frottement doux dans une pièce fixe enduite de vaseline.

On calcule les dimensions de l'ensemble, lame de quartz et dispositif de transmission, de façon que sa fréquence propre soit au moins dix fois la fréquence du phénomène à étudier.

La déformation élastique du quartz n'entraîne que des déplacements très faibles du dispositif de transmission, elle n'interviendra pratiquement jamais pour modifier appréciablement le phénomène qu'on se propose d'étudier, alors qu'il n'en est pas de même avec beaucoup d'autres méthodes.

En effet, si la lame utilisée a comme dimensions :

1 cm d'épaisseur ;

3 cm² de section ;

pour un effort de 300 kilos appliqué, la déformation du quartz sera :

$$d = \frac{1}{E} \frac{F}{S} = \frac{300.1000.981}{7850.10^8.3} = 1,25.10^{-4} \text{ cm.}$$

car pour le module d'Young du quartz on doit prendre $E = 7850.10^8$.

On peut prévoir de cette façon que la déformation élastique du quartz utilisé ne dépassera en aucun cas le centième de millimètre.

Ordre de grandeur des charges obtenues. — Si on utilise une lame de Curie (cas de faibles efforts) dont le rapport entre la longueur et

l'épaisseur est de 200, la quantité d'électricité obtenue sera alors, si l'on prend comme valeur du module $7 \cdot 10^{-8}$:

$$Q = 7 \cdot 10^{-8} \cdot 10^3 \cdot 981 \cdot 200 = 13,74 \text{ U. E. S. C. G. S. par kilo}$$

ou $Q = 4,57 \cdot 10^{-9}$ coulombs.

Si, au contraire, l'effort agissait suivant l'axe électrique de la lame, on aurait :

$$Q = 7 \cdot 10^{-8} \cdot 10^3 \cdot 981 = 6,87 \cdot 10^{-2} \text{ U. E. S. ou } 2,23 \cdot 10^{-11} \text{ coulombs.}$$

2. *Essai du quartz.* — Avant la taille définitive de la lame, nous avons chaque fois examiné les lames par la méthode des figures de corrosion artificielles. On peut ainsi déterminer avec exactitude le tracé des régions maclées, zone dans lesquelles la quantité d'électricité fournie par effet piézo-électrique est de signe contraire à la normale. La lame de quartz brute de coupe ayant été ainsi examinée, on taille dans les régions saines les lames à utiliser ; on est alors certain de disposer d'une lame douée d'une constante piézo-électrique convenable. Toutefois, on procède encore au contrôle électrométrique de la lame pour déterminer le sens de l'axe électrique intéressé et déceler, le cas échéant, une anomalie qui aurait subsisté.

3. *Choix de la disposition du quartz.* — Comme nous l'avons vu, deux dispositions de taille sont utilisées : 1^o disposition de Curie ; 2^o taille ordinaire. Dans la disposition de Curie, l'effort s'exerce perpendiculairement aux deux axes, optique et électrique. Comme nous l'avons vu également, cette disposition donne une grande sensibilité ; elle conviendra donc lorsqu'on aura de petits efforts à étudier, par exemple dans le cas de pressions variant entre 0 et 100 kilos par centimètre carré.

Pour des efforts plus considérables, il est plus rationnel d'employer la taille ordinaire où l'effort parallèle à l'axe électrique s'exerce sur la grande face de la lame. Dans ces conditions, la lame peut supporter des efforts plus considérables et elle se trouve plus stable dans son logement, puisqu'elle repose sur une de ses grandes faces. Dans ce cas, la sensibilité est plus faible ; pour l'augmenter, il est commode d'utiliser deux lames de quartz de dimensions identiques avec une armature (armature isolée) disposée entre les 2 lames. Ces deux lames doivent présenter leurs axes électriques en sens opposé de façon que les quantités d'électricité fournies s'ajoutent (voir fig. 15).

Dans cette disposition, l'isolement de l'armature interne se

trouve assuré par les deux lames de quartz elles-mêmes, les armatures mises à la masse peuvent être constituées par le support métallique lui-même.

Les dimensions à donner au quartz seront naturellement directement fonction de l'effort à supporter. Le quartz, comme nous l'avons dit, a une résistance à la compression très considérable ; toutefois, cette résistance sera apparemment très basse si on ne prend pas la précaution de bien répartir la pression sur toute la surface du quartz.

Si l'on place directement une lame de quartz taillée de façon cou-

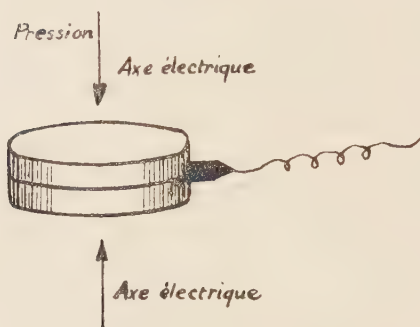


FIG. 15. — Disposition des lames de quartz pour l'étude des efforts variables de grande amplitude

rante (la surface étant plane au $2/100$ de millimètre près), au contact d'un support métallique en acier doux par exemple, travaillé avec la même précision, le quartz n'est pas en contact par toute sa surface ; mais en général, il sera en contact seulement par trois points, ou trois petites surfaces s'il y a déformation par l'effort appliqué. Ces petites surfaces travailleront à haute pression alors

que le reste de la surface ne supportera rien. Le quartz étant très rigide, il peut ainsi être cassé avec un effort total très faible, variable avec la précision de taille des surfaces. Pour éviter de tels accidents, il y a lieu d'interposer, de façon à bien répartir l'effort, une lame mince de matière plastique entre le quartz et ses supports ; on utilisera par exemple, des lames de plomb de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur. Avec cette précaution, la pression que peut supporter le quartz atteint facilement 800 kilos par centimètre carré.

4. *Boîte support du quartz.* — Le quartz est lui-même un bon isolant au point de vue électrique, mais il est assez hygroscopique et peut ainsi devenir apparemment conducteur ; pour supprimer cette conductibilité en surface, le quartz doit être préalablement nettoyé soigneusement avec de l'alcool pur ou de l'éther. Pour le protéger ensuite de l'humidité ambiante son support devra être entièrement clos ; il devra être métallique pour soustraire le quartz aux actions électrostatiques du voisinage. Il a été nécessaire de prévoir égale-

ment un dispositif de dessiccation de l'atmosphère de la boîte-support ; pratiquement, il est commode d'employer un simple tube de verre contenant du sodium métallique, de l'anhydride phosphorique ou de la chaux vive. Cette boîte est reliée directement avec le récipient où règne la pression à étudier. Pour cette liaison deux solutions ont été envisagées et utilisées suivant les cas.

Pour les faibles pressions, l'écrasement du quartz est extrêmement faible, on pourra alors utiliser, sans aucun inconvénient pour la transmission, une lame métallique légèrement déformable (lame métallique plane ou mieux amincie sur la périphérie). Les seules conditions à réaliser seront que, d'une part, la lame de transmission résiste à la pression à mesurer et que, d'autre part, la fréquence propre de l'ensemble quartz-lame transmettrice soit très grande par rapport à la fréquence des variations de pression à enregistrer, condition nécessaire à une transmission fidèle. En pratique, on prendra pour ce système si t est la période du phénomène à étudier, une période T égale à environ $t/10$. Pour des pressions plus considérables, le système précédent ne peut plus être utilisé pratiquement, bien que théoriquement, il soit encore valable, puisque la déformation du quartz ne devient jamais importante, mais l'effort transmis deviendrait trop important. On utilise alors un dispositif à piston permettant de réduire dans un rapport connu l'effort transmis au quartz. Dans des cas il est encore nécessaire de s'assurer que l'ensemble quartz-piston possède une fréquence propre beaucoup plus élevée que la fréquence du phénomène à étudier.

5. *Liaison quartz-amplificateur.* — La liaison entre les armatures et l'entrée de l'amplificateur doit être assurée par un conducteur protégé contre les actions électrostatiques du voisinage, du type de ceux qu'on utilise dans les mesures électrométriques courantes. L'armature isolée du quartz est reliée par l'intermédiaire de bornes isolées à l'ambre au fil central du conducteur ; l'autre extrémité de ce même fil est branchée à l'entrée isolée de l'amplificateur. L'armature à la masse est reliée directement à la protection métallique, connectée elle-même à l'entrée masse de l'amplificateur.

Les conditions que doit remplir le conducteur sont les suivantes :

- 1^o Présenter un isolement excellent entre le fil et la protection ;
- 2^o Avoir une capacité électrique bien définie qui ne soit pas trop grande. Cette capacité vient en effet shunter le quartz et tend à diminuer la sensibilité du montage. Pour éviter des variations possibles dans la valeur de cette capacité, il est utile de maintenir le fil

intérieur du conducteur pour éviter des déplacements par rapport à l'enveloppe de protection ;

3° Avoir des résistances de contact aussi petites que possible à l'endroit des connexions, ces résistances donnant une valeur mal définie au potentiel moyen autour duquel se font les variations. Pour la commodité des liaisons sur place le conducteur a été construit en tubes métalliques coulissant les uns dans les autres de façon à permettre le réglage de sa longueur.

6. *Amplificateur : conditions à réaliser.* — La condition la plus essentielle au point de vue de la réalisation d'un amplificateur convenable est l'isolement dans son étage d'entrée. En effet, pour que la variation de courant obtenue par la suite soit proportionnelle à l'effort, il faut que la grille de l'étage d'entrée de l'amplificateur conserve de façon convenable les charges fournies par le quartz. C'est là la difficulté principale de la mise au point de cet amplificateur spécial.

Les lames ordinaires utilisées en T. S. F. ne peuvent convenir pour ce premier étage, car elles ont des courants grille inverses relativement très importants par rapport aux quantités d'électricité mises en jeu par le quartz. Ce phénomène de courant inverse est dû au moins en grande partie, au fait que lorsque les électrons passent du filament à la plaque ils traversent la région d'atmosphère raréfiée où se trouve la grille ; ces électrons provoquent par chocs l'ionisation de l'atmosphère gazeuse d'où apparition d'ions positifs qui viennent décharger la grille. A ceci s'ajoute naturellement la conductibilité du verre interposé entre la grille et le filament. Pour tourner cette difficulté, le R. P. Lejay ⁽¹⁾ a proposé d'utiliser dans des mesures électrométriques analogues, un montage à lampe bigrille ; dans ce montage, la grille de commande est la grille extérieure, la grille intérieure jouant le rôle de plaque ; on évite ainsi que la grille de commande ne se trouve dans l'espace parcouru par les électrons, ce qui permet d'obtenir un courant inverse nettement plus faible.

C'est à Hocart ⁽²⁾ que l'on doit l'application et la mise au point au laboratoire de ce dispositif à bigrille pour l'étude des variations de pression dans les canalisations d'eau à l'aide du quartz. Dans ce

(1) LEJAY, *L'Onde électrique*, octobre et novembre 1926.

(2) HOCART, *Enregistrement oscillographique des variations instantanées de la pression dans les canalisations d'eau, par l'intermédiaire d'un quartz piézo-électrique* (*Journal de Physique*, 1928).

montage, la bigrille qui doit être spécialement choisie, est utilisée dans les conditions suivantes : la grille intérieure est polarisée positivement à un potentiel fixe de 20 à 50 volts suivant les lampes et reçoit tous les électrons émis par le filament ; la plaque est reliée directement au filament et ne sert que de protection électrostatique pour l'ensemble. La grille extérieure est polarisée de façon suffisamment négative pour qu'elle ne reçoive pas d'électrons et que, lorsque son potentiel variera, on se déplace sur la partie droite de la caractéristique de grille intérieure (tension négative de 100 à 250 volts). Cette grille est reliée à l'armature isolée du quartz dont elle subit les variations de potentiel.

Examinons maintenant les conditions de fonctionnement de ce dispositif : lorsque l'effort variera le quartz fournira à la grille extérieure de la bigrille des charges électriques d'un signe déterminé, ces charges modifiant le potentiel de la grille d'une quantité proportionnelle à la variation de l'effort subi par le quartz. Par l'intermédiaire du champ électrique grille extérieure-filament, cette variation de potentiel va modifier le courant de grille intérieure ; cette variation de courant ne sera pas toujours proportionnelle à la variation de potentiel de la grille extérieure si on dépasse certaines limites. Pour déterminer les limites de proportionnalité, il est nécessaire de tracer les caractéristiques de la bigrille employée dans les conditions indiquées plus haut. Ces courbes fournissent immédiatement l'intervalle cherché. Il est à noter que ces conditions de proportionnalité ne sont pas indispensables théoriquement, mais il est plus commode pour la lecture des tracés d'avoir une échelle linéaire.

L'ordre de grandeur des variations possibles du potentiel grille extérieure est d'environ 100 volts avec les bigrilles que nous avons utilisées (voir un exemple de caractéristique de courant grille intérieure en fonction du potentiel grille extérieure, fig. 16).

Pour limiter cette variation de potentiel, un procédé très simple consiste à shunter le quartz par une capacité variable permettant l'ajustement de la variation de potentiel pour toutes les valeurs possibles de variations d'effort à étudier. Ce condensateur variable doit naturellement posséder un excellent isolement de façon à ne pas provoquer de fuite de charge électrique.

La capacité de la grille extérieure de la bigrille étant très faible, on peut la négliger en première approximation et si nous désignons par ΔU la variation de potentiel permise, par C la capacité inconnue

à ajouter au quartz et par ΔF la variation approximative de l'effort à étudier, on aura d'après l'équation (3) et pour la disposition de Curie :

$$\Delta U = \frac{4\pi\delta \cdot h \cdot \Delta F}{Klh + 4\pi eC}$$

d'où

$$C = \frac{\delta \cdot h \cdot \Delta F}{\Delta U \cdot e} - \frac{Klh}{4\pi \cdot e} \quad (5)$$

Les dimensions du quartz étant choisies, on aura immédiatement l'ordre de grandeur de la capacité à mettre en shunt sur le quartz C.

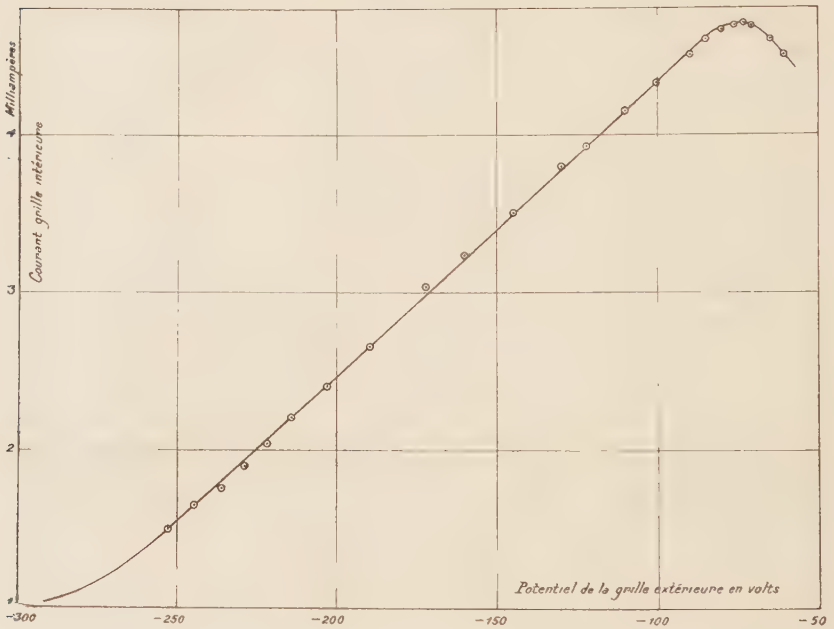


FIG. 16
Courbe caractéristique du courant grille intérieure d'une bigrille
en fonction du potentiel de la grille extérieure

L'étage à bigrille monté comme il vient d'être indiqué, joue le rôle d'un électromètre sans inertie ; il suffira alors d'employer une résistance fixe de quelques milliers d'ohms placée dans le circuit de grille intérieure, pour relier cet étage à un ou plusieurs étages amplificateurs à lampes triodes appropriées au type d'oscillographe employé. Cet oscillographe étant placé dans le circuit plaque de la

grille extérieure f est, par l'intermédiaire du quartz, portée à un potentiel négatif élevé de 100 à 250 volts. Ce premier étage est relié aux étages amplificateurs à résistances et piles de liaison qui le suivent par une résistance de 4 à 10.000 ohms suivant la résistance apparente de l'espace filament-grille intérieure.

La sensibilité du dispositif peut être à volonté augmentée ou diminuée en shuntant le quartz par une capacité variable k , ou encore, si ce premier réglage est insuffisant, en intercalant entre la bigrille et l'oscillographe un nombre différent d'étages amplificateurs.

Depuis l'étude du montage à bigrille par Hocart en 1927, nous avons pu remplacer la lampe bigrille par un autre type de lampe mieux adapté à ce genre d'application, parce que, spécialement construit pour des mesures électrométriques, l'électromètre triode Philips. Cette lampe présente les avantages suivants :

1^o Le vide étant plus poussé à l'intérieur de la lampe, le maximum de courant inverse de grille est beaucoup plus faible. Il ne dépasse plus $5 \cdot 10^{-15}$ ampères et peut descendre pour certaines lampes jusqu'à $5 \cdot 10^{-16}$ ampères ; 2^o la longueur de verre entre le filament et la grille est rendue maximum à l'aide de supports en verre spécial, ce qui permet de réduire considérablement les fuites par conductibilité du verre ; 3^o cette lampe fonctionne, dans des conditions convenables, avec des tensions d'alimentation de plaque et des tensions de polarisation de grille beaucoup plus faibles ; 4^o cette lampe possède un coefficient d'amplification supérieur à un, alors que la bigrille employée, dans les conditions indiquées, présente un coefficient d'amplification inférieur à un.

Nous avons utilisé cette lampe dans les conditions suivantes :

La tension d'alimentation de plaque ne doit pas dépasser 15 volts, la caractéristique obtenue dans ces conditions montre que le champ possible de variation du potentiel grille est de 12 volts environ, il est donc nécessaire de shunter le quartz par une capacité environ dix fois plus grande que dans le montage à bigrille à variation d'effort égale. Ces conditions sont avantageuses, d'une part parce que les influences parasites auront un effet beaucoup plus faible et d'autre part, la capacité de l'ensemble quartz-shunt étant beaucoup plus grande et la tension par conséquent plus faible pour un même effort, les fuites par les isolants seront réduites dans un rapport considérable. En plus, ces lampes étant construites pour des mesures électrométriques, présentent toutes un isolement grille filament convenable et il n'est plus nécessaire de les choisir spéciale-

ment comme on doit le faire pour les bigrilles. L'armature isolée du quartz et celle de la capacité shunt sont toujours reliées à la grille de la triode électromètre. Il suffit de polariser cette grille à une faible valeur négative, 2 volts environ. Le champ de variation étant de 12 volts dans le sens des polarisations plus négatives, il faudra ainsi disposer le quartz de façon que les charges négatives arrivent sur la grille. Dans le circuit-plaque de cette lampe, la plaque étant alimentée sous 15 volts environ, on introduit une résistance de 50 à 100.000 ohms au lieu de 4 à 10.000 pour les bigrilles. Les étages amplificateurs sont montés dans les mêmes

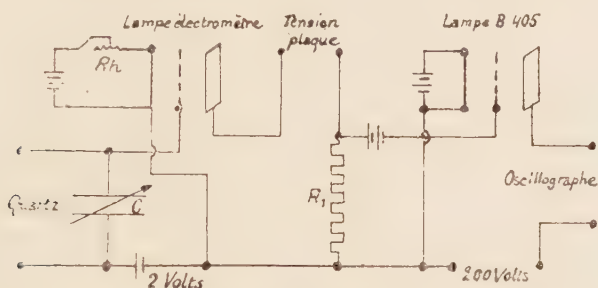


FIG. 18. — Schéma du montage de l'amplificateur associé à un étage comportant une triode électromètre

conditions qu'avec la bigrille. Voir sur la figure 18, le schéma de ce montage.

7. *Oscillographe.* — Nous avons indiqué que l'oscillographe était placé dans le circuit plaque du dernier étage de l'amplificateur. Il est nécessaire, si l'on veut obtenir un tracé à échelle linéaire, de vérifier que, dans le domaine où l'on opérera, les déviations de l'oscillographe sont bien proportionnelles aux variations du courant qui le traverse. Il faut s'assurer également, avant l'emploi, que l'oscillographe pourra suivre fidèlement les variations de l'effort ; pour cela, il est nécessaire que cet oscillographe possède une fréquence propre considérablement plus élevée que la fréquence des variations à étudier. En pratique, il faudra que cette fréquence propre soit environ dix fois plus élevée que la fréquence des variations à étudier. On n'a pas intérêt à augmenter trop cette fréquence propre, car on sait que la sensibilité d'un oscillographe diminue quand sa fréquence propre augmente. L'amortissement de l'oscillographe doit être réglé au voisinage de l'amortissement critique, il est d'ailleurs bon de vérifier souvent cet amortissement.

Pour les fréquences de 0 à 1.000 p. p. s., on peut utiliser un oscillographe électromagnétique à grande sensibilité du type Dubois, dont la fréquence propre peut varier entre 1.000 et 3.000 p. p. s. — Pour des fréquences plus élevées, de 1.000 à 4.000 p. p. s., il faut avoir recours aux oscillographes à boucles du type Blondel, dont la fréquence propre peut atteindre 12.000 p. p. s. — Si l'on voulait étudier des phénomènes encore plus rapidement variables il faudrait alors employer l'oscillographe à rayons cathodiques. Cet oscillographe est d'un emploi moins pratique, mais il peut suivre les fréquences les plus élevées.

8. *Enregistrement photographique.* — Pour ne pas modifier la fréquence propre de l'oscillographe, il est nécessaire, et d'ailleurs pratique, d'utiliser un enregistrement sur papier photographique. Un des avantages de cet enregistrement est de reproduire les courbes en coordonnées *cartésiennes*, alors qu'un enregistrement mécanique, sur papier enduit de noir de fumée par exemple, donne généralement des courbes en coordonnées circulaires, ce qui introduit une sérieuse difficulté pour l'interprétation des courbes obtenues. On utilise alors suivant les cas deux types principaux d'enregistreurs :

1^o Pour les enregistrements de phénomènes mettant en jeu des efforts variant avec une fréquence de 0 à 1.000 p. p. s., on peut utiliser un enregistreur photographique à rouleaux de papier sensible se déroulant de façon continue. Ce système présente l'avantage de ne pas superposer les différentes phases du phénomène à enregistrer ; 2^o pour les enregistrements de phénomènes plus rapides, mettant en jeu des fréquences supérieures à 1.000 p. p. s., on est obligé d'utiliser un enregistreur à tambour tournant, sur lequel un cylindre de papier sensible est fixé. Ce cylindre peut alors tourner à une vitesse aussi grande qu'il est nécessaire.

Il faut naturellement que tout le dispositif soit à l'abri complet de la lumière, sauf suivant la fente où se fait l'image de la lampe qui éclaire l'oscillographe. Il est de plus nécessaire que le tambour ou la boîte châssis soit amovible pour permettre le transport des tracés à la chambre noire.

Cette méthode nous a permis d'étudier des pressions variables dans différents cas, avec de bons résultats. Nous allons examiner en particulier son application à l'étude des coups de bélier dans les conduites courtes.

CHAPITRE V

APPLICATION PRATIQUE DE CETTE MÉTHODE A L'ÉTUDE DES COUPS DE BÉLIER DANS LES CONDUITES COURTES

I. — *Introduction*

On désigne sous le nom de « coups de bélier » les variations de pression provoquées dans les conduites sous l'influence des variations de vitesse de l'eau ; variations produites par exemple, par la fermeture ou l'ouverture d'une vanne.

On sait depuis longtemps que la fermeture brusque d'une conduite d'eau produit des surpressions qui peuvent être dangereuses pour sa solidité. Les conduites d'alimentation des turbines hydrauliques sont exposées tout particulièrement à des ouvertures ou à des fermetures brusques par suite du fonctionnement constant du régulateur de vitesse. Dans ces conduites, souvent très longues et de gros diamètres, les vitesses d'écoulement sont toujours considérables et les coups de bélier ont tendance à s'y produire avec une grande intensité.

Ces considérations expliquent pourquoi les ingénieurs hydrauliciens se sont intéressés presque exclusivement jusqu'ici à l'étude, tant théorique qu'expérimentale, des coups de bélier dans les conduites de gros diamètres et de grande longueur, alimentées sous des pressions de régime considérables. Dans ces conduites, les hauteurs de chute atteignent en effet très fréquemment 500 et 1.000 m.

C'est seulement à la fin du siècle dernier que des études sérieuses ont été faites sur ces phénomènes de coups de bélier. Allievi (34) dit dans la préface de son mémoire sur la théorie des coups de bélier : « Ces phénomènes n'ont pas été, jusqu'à 1904, l'objet de recherches théoriques systématiques, les traités d'hydraulique se bornant en général à des déductions et développements des formules bien connues de l'écoulement permanent. On ne consacrait que quelques lignes au plus important des phénomènes de mouvement varié,

désigné depuis longtemps sous le nom de coups de bélier, mais, en l'absence d'une théorie acceptable, les règles et précautions pour maîtriser cette sorte de phénomène assez souvent dangereuse, étaient restées du ressort du pur empirisme. » Dans cet ouvrage, Allievi se préoccupa de donner la théorie physique de ces phénomènes, théorie qui est restée classique depuis cette époque. Dans ce travail, il envisage le cas de conduites longues et il suppose le phénomène de coup de bélier continu et d'amplitude inférieure à la pression d'alimentation des conduites.

Avant Allievi, le caractère oscillatoire des coups de bélier avait été reconnu et étudié par J. Michaud entre autres, qui établit que cette allure oscillatoire se produit même en l'absence d'une chambre à air dans la conduite, grâce au seul jeu de l'élasticité des parois et de la compressibilité de l'eau. A cette époque, Joukowski (35) a également publié un mémoire à Saint-Petersbourg, mais ce mémoire est très peu connu en France. Depuis, des théoriciens comme MM. Jouguet, Rateau, Camichel, Eydoux et Gariel, de Sparre et Bergeron, ont contribué à développer la théorie de ces phénomènes.

De nombreux expérimentateurs, parmi lesquels on doit citer tout particulièrement MM. Joukowski (35), Rateau (36) et Camichel (37) ont cherché à vérifier la théorie classique par des expériences sur des conduites de gros diamètre et de grande longueur. Ces expériences ont porté en particulier sur des conduites d'usines hydro-électriques et sont venues confirmer la théorie de façon satisfaisante.

Mais, à ma connaissance, l'étude complète de ces phénomènes n'avait pas été entreprise dans le cas de conduites courtes de petit diamètre avec des temps de fermeture très courts (de 1/10 à 1 seconde environ). Ces conditions sont du domaine de la pratique, car on les rencontre fréquemment, en particulier dans les canalisations d'eau des immeubles.

Cette étude met en jeu des variations de pression très rapides, qui prennent souvent un aspect voisin d'une véritable discontinuité, d'autre part, les surpressions sont très importantes et peuvent dépasser 100 kilos par centimètre carré.

Dans de telles conditions, l'étude des coups de bélier était rendue pratiquement impossible, jusqu'ici, à cause de l'inertie importante des manomètres enregistreurs courants

C'est grâce à l'emploi du quartz que nous avons pu faire l'étude précise de ces phénomènes.

II. — *Expériences réalisées au laboratoire des compteurs d'eau de la Ville de Paris*

I. — *Réalisation pratique de l'appareil enregistreur.* — Conformément aux principes indiqués plus haut, il nous a été possible de faire réaliser un appareil enregistreur pour les variations de pression dans les canalisations. Cet appareil se présente sous une forme pratique, pour ainsi dire industrielle ; l'appareillage est combiné de façon à être solidement fixé sur une table et peut se démonter facilement. La table elle-même est démontable en plusieurs parties de façon que l'ensemble puisse se loger facilement dans des caisses spécialement aménagées pour le transport. Ce point a une importance particulière si l'on veut par exemple pouvoir opérer facilement en différents points d'une même conduite.

L'enregistreur ainsi réalisé, se décompose en quatre parties principales :

- a) Relai piézo-électrique à lame de quartz ;
- b) Amplificateur à lampes ;
- c) Oscillographe ;
- d) Enregistreur photographique et son moteur.

Nous indiquerons successivement la façon dont on a réalisé chacune de ces parties :

a) *Relai piézo-électrique.* — Comme il s'agit ici d'efforts de l'ordre de 100 kilos par centimètre carré au maximum, nous avons choisi pour le quartz la disposition de Curie ; les dimensions du quartz, déterminées suivant le principe indiqué précédemment sont :

Épaisseur : $e = 1$ cm ;

Largeur : $l = 3$ cm ;

Hauteur : $L = 3$ cm.

Pour assurer l'isolement, les armatures sont collées à 3 mm en retrait des bords des grandes faces du quartz. La boîte support de quartz se décompose en deux parties ; une première partie constitue le support de quartz proprement dit ; elle consiste en une pièce de fonderie en laiton, boîte cylindrique à fond épais indéformable ; elle comporte une collerette terminale percée de trous permettant la fixation à l'autre partie au moyen de boulons. La deuxième partie est une pièce raccord permettant de monter le quartz et sa boîte sur toutes les conduites à expérimenter. Un orifice fileté permet de raccorder à cette région de la conduite, un manomètre métallique ou un manomètre à mercure. Pour éviter de modifier le phénomène

de coup de bélier, ces manomètres devront être reliés à cette pièce par l'intermédiaire d'un robinet métallique de mise hors circuit. La lame de quartz portant ses armatures métalliques est fixée par collage dans la rainure d'un socle métallique indéformable, tandis que son autre extrémité repose sur la lame élastique de transmission. Cette lame élastique en acier à ressort se présente sous la forme d'un disque rigide comportant une large saignée circulaire réduisant

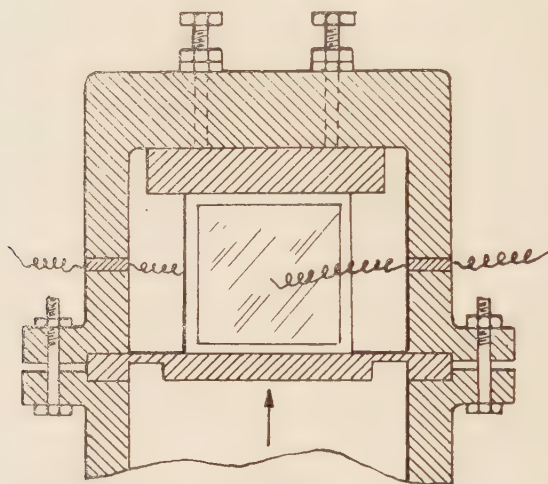


FIG. 19. — Disposition de la lame de quartz et de son support dans l'étude des coups de bélier

l'épaisseur à $4/10$ de millimètre environ. Cette pièce est encastrée par sa périphérie entre les deux parties de la boîte support, de façon à être totalement immobilisée par son pourtour. La masse cylindrique centrale de cette lame élastique, contre laquelle s'appuie la lame de quartz, subit un effort proportionnel à la pression à mesurer et le transmet au quartz. Pour régler et uniformiser l'application de la lame de quartz contre la lame élastique, on dispose entre ces deux pièces une lame mince de plomb de 2 ou $3/10$ de millimètre d'épaisseur. De plus, pour assurer le serrage du quartz contre la lame élastique, le socle peut être déplacé par l'intermédiaire de deux vis, munies d'écrous de blocage qui traversent le fond de la boîte. Voir figure 19 le schéma de ce montage.

Comme nous l'avons indiqué, les dimensions du système formé par le quartz et la lame élastique sont calculées de façon que sa

fréquence propre soit largement supérieure aux fréquences de variations de la pression à enregistrer. Ces fréquences sont prises, ici, comme ne dépassant pas 200 p. p. s., ce qui se montre justifié par la pratique.

b) *Amplificateur*. — Dans ce cas particulier, l'amplificateur comporte seulement deux étages à lampes. Un premier étage est constitué par l'étage à bigrille ou à triode électromètre, étage monté comme nous l'avons indiqué au début du précédent chapitre. Ici, pour une amplitude de variation de pression de 100 kilos par centimètre carré au maximum, la capacité variable à mettre en shunt sur le quartz, calculée suivant la formule (5) est trouvée de l'ordre de 0,5 millième de microfarad avec une bigrille et de 5 millièmes de microfarad avec une lampe électromètre. Le deuxième étage est un étage amplificateur à résistances. Les types de lampes employés ont été les R.T-56 et les B-443 avec le montage à bigrille, la grille de ces lampes étant polarisée à — 4 volts environ. Avec le montage à triode électromètre, nous avons utilisé une lampe B-405 avec une polarisation de grille de — 10 volts.

Pour améliorer l'isolement de la grille intérieure de la bigrille ou de la grille de la lampe électromètre, on dispose autour de ces lampes une cloche hermétiquement close sous laquelle on place une coupelle contenant un desséchant. Un essai statique montre que, dans ces conditions, les fuites ne sont que de 10 à 15 % de la quantité d'électricité totale en une minute avec une bonne bigrille et de 1 à 2 % avec la lampe électromètre, ce qui est largement suffisant pour obtenir de bons enregistrements. Le condensateur en shunt sur le quartz permettra, dans chaque sorte d'expérience, d'ajuster la sensibilité du montage pour obtenir le maximum d'amplitude compatible avec la largeur du papier photographique.

c) *Oscillographe*. — Nous avons choisi pour ce travail, un oscillographe électromagnétique à grande sensibilité, du type Dubois. La fréquence des phénomènes à étudier se trouvant être dans le domaine où un oscillographe de ce type est suffisant. La fréquence propre de l'oscillographe employé est de 1.500 p. p. s. et sa sensibilité de 1,4 cm à 1 mètre pour une variation de courant de 1 milliampère. L'amortissement est obtenu par coton hydrophile imprégné d'huile Mobiloil C. Cet oscillographe porte sur son équipement mobile un petit miroir concave de 1 mètre de rayon de courbure. Un faisceau de lumière parallèle obtenu avec une lampe à filament métallique linéaire, une lentille convergente et une fente, tombe sur le miroir

de l'oscillographe et, après réflexion, vient impressionner le papier de l'enregistreur photographique, après avoir traversé une fente horizontale. Cette fente protège le papier sensible contre les lumières parasites. Pour la commodité du réglage optique, l'oscillographe est monté sur un support pivotant autour d'un axe vertical. La rotation de l'oscillographe est assurée par pignon et vis tangente. La distance de l'oscillographe à la lampe à filament rectiligne et au papier sensible, est réglée une fois pour toutes et ces différentes pièces sont ensuite solidement vissées sur la table pour éviter tout déplacement.

d) *Enregistreur photographique et son moteur.* — L'enregistreur photographique est essentiellement constitué par : 1^o une chambre noire contenant un rouleau de papier photographique très sensible de 60 mètres de longueur, perforé latéralement à la manière d'un film cinématographique. Ces perforations latérales permettent d'obtenir un entraînement forcé sans glissement possible ; 2^o un dispositif de déroulement du papier, comportant des pièces guides, des engrenages et un volant de plomb pour régulariser le mouvement ; 3^o une boîte châssis avec couvercle étanche à la lumière. Cette boîte sert à emmagasiner le papier impressionné et permet son transport à la chambre noire ; 4^o un moteur électrique universel avec régulateur de vitesse à force centrifuge. Ce moteur assure le déroulement du papier à vitesse constante. La vitesse de ce moteur est rendue constante au millième près.

Le mouvement du moteur est démultiplié par un dispositif à vis et roue tangente enfermé dans un carter à bain d'huile et transmis par courroie au volant d'entraînement du papier. Les vitesses d'entraînement du papier, susceptibles d'être obtenues avec les différents jeux de poulies sont :

5 — 10 — 15 cm par seconde.

L'entraînement s'obtient à volonté par l'intermédiaire d'un déclencheur. On peut opérer avec cet enregistreur en plein jour et même en plein soleil, grâce à un tunnel qui protège le film de papier sensible contre les lumières extérieures.

Voir figure 20, la vue d'ensemble de l'appareil.

II. *Utilisation de cet appareil. — Possibilités nouvelles.* — Le dispositif d'ensemble ainsi réalisé, permet d'enregistrer instantanément sur un film de papier sensible des variations de pression en fonction du temps de fréquence comprise entre 0 et 1.000 p. p. s. Sa fidélité est parfaite, puisque l'inertie de l'ensemble peut à juste

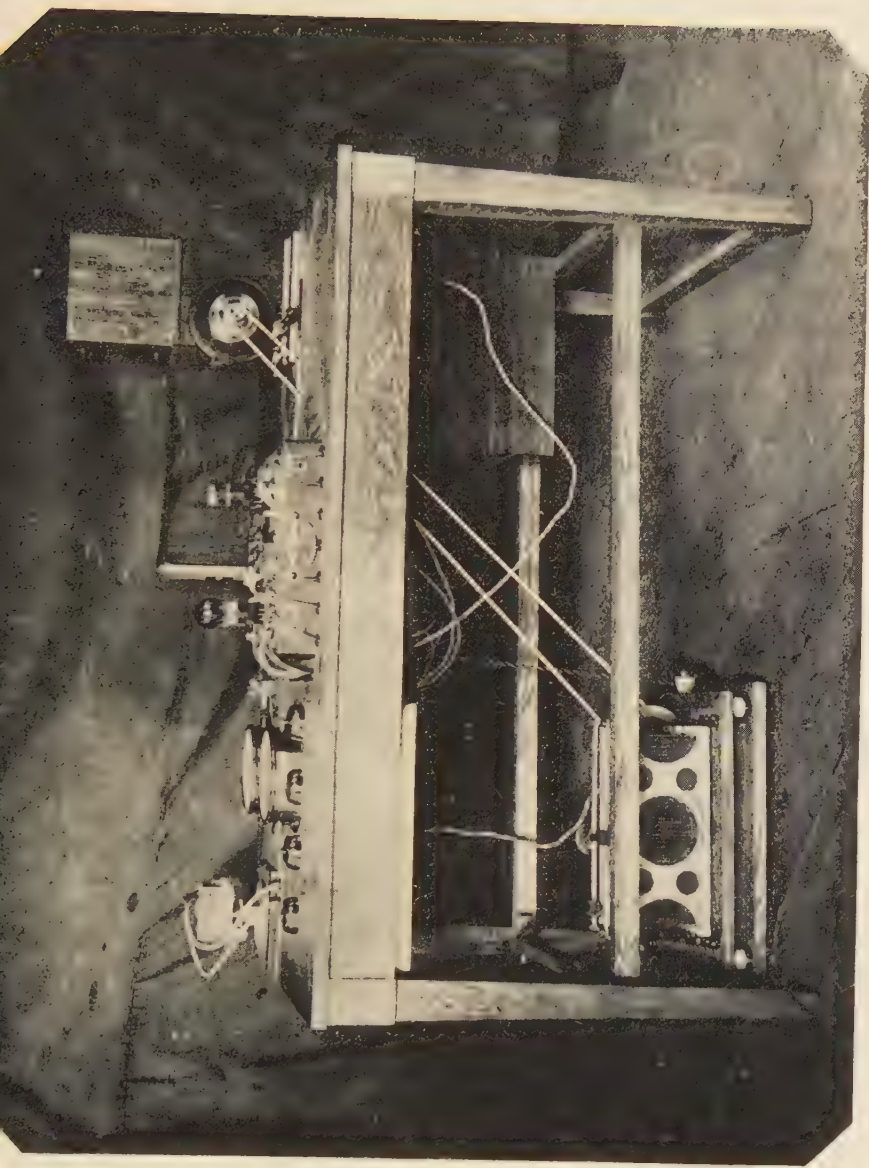


FIG. 26. — Vue générale de l'appareil utilisé pour l'étude des coups de bélier sur conduite courte

titre être considérée comme négligeable. La sensibilité de cet appareil peut varier à volonté de façon continue au moyen du condensateur variable qui shunte la capacité entre armatures du quartz. Ainsi, dans chaque cas particulier de variation de pression, il sera facile de régler la sensibilité de l'enregistreur de façon à obtenir un tracé à échelle convenable. On pourra aussi bien réaliser l'enregistrement de variations très faibles autour de la pression du régime, telles que les vibrations musicales qui accompagnent l'ouverture de certains robinets que les variations de très grandes amplitudes dues aux plus violents coups de bélier. Une alimentation électrique autonome par accumulateurs permet de procéder à des enregistrements en un lieu quelconque.

III. *Phénomènes de coups de bélier à enregistrer.* — Les coups de bélier que l'on peut se proposer d'enregistrer sur une conduite d'eau sont de deux sortes :

- 1^o Coups de bélier d'ouverture ou négatifs ;
- 2^o Coups de bélier de fermeture ou positifs.

Le coup de bélier négatif étant provoqué par l'ouverture d'un robinet placé sur la conduite, par exemple, en bout de conduite, ne peut comporter de dépressions ou de surpressions importantes, ce sera donc le moins intéressant au point de vue pratique et technique ; étant très vite amorti, il ne peut jamais être dangereux.

Au contraire, le coup de bélier positif, provoqué par la fermeture d'un robinet placé sur la conduite, atteint souvent des pressions élevées ; moins vite amorti que le coup de bélier négatif, il peut devenir dangereux pour les canalisations et les appareils en service (robinet, compteur), etc. C'est pourquoi, dans le travail expérimental effectué, nous nous sommes préoccupés, presque exclusivement, des coups de bélier de fermeture ; bien que l'appareil utilisé permette d'enregistrer facilement et avec une échelle convenable les coups de bélier d'ouverture.

Nous avons pu faire varier l'intensité de la surpression dans de larges limites, depuis 0 kg 5 jusqu'à 80 kilos par centimètre carré. Nous nous sommes limités à l'étude des coups de bélier dans les conduites courtes et de petit diamètre. Les temps de fermeture des vannes ont varié, mais sont restés systématiquement compris entre 1/10 et 1 seconde environ, ce sont précisément les conditions dans lesquelles cette étude n'avait pu être faite antérieurement.

IV. *Conduites employées.* — L'étude a porté sur les coups de bélier obtenus avec des conduites de type aussi courant que possible.

Dans cet esprit nous avons choisi des conduites en acier et en plomb.

a) *Conduites en acier.* — Jusqu'ici, les conduites d'acier utilisées dans les expériences ont été de trois diamètres différents :

Conduite de 33 mm de diam. intér. et de 42 mm de diam. extér. ;

—	20	—	—	27	—	—
—	8	—	—	13	—	—

b) *Conduites en plomb.* — Nous n'avons utilisé actuellement qu'un seul diamètre de conduite en plomb : conduite de 20 mm de diamètre intérieur et de 34 mm de diamètre extérieur. Des tronçons rectilignes de ces diverses conduites ont été utilisés d'abord, en remontant ensuite à des dispositions plus compliquées. N'ayant pas eu la possibilité de brancher ces conduites sur un réservoir de capacité suffisante, nous les avons raccordées, comme on le fait toujours dans la pratique, à des conduites de gros diamètre 60 mm et 200 mm de diamètre intérieur, alimentées par les réservoirs de la ville.

Dans ces conditions, il y a apparition de surpressions parasites dues aux coups de bélier dans les grosses conduites, mais on peut tenir compte des surpressions supplémentaires ainsi produites ; on peut tenir compte de la surpression produite dans la conduite de 200 mm sur laquelle notre conduite était piquée, conduite qui remplace le réservoir théorique.

Cette conduite était en fonte de 1 cm d'épaisseur environ ; la vitesse de propagation des ondes sera dans cette conduite :

$$a = \frac{9.900}{48,3 + k \frac{d}{e}} = 1.200 \text{ m par seconde}$$

puisque $k = 1$ pour la fonte. Dans le cas où une conduite de 30 mètres de longueur est directement piquée sur cette grosse conduite, et si cet élément rectiligne de 30 mètres est réalisé en tube acier 33/42 mm. La vitesse d'écoulement dans le tube acier était en régime permanent d'écoulement :

$$V_0 = 5,20 \text{ m par seconde}$$

la vitesse correspondante v_0 dans la conduite en fonte de 200 mm sera :

$$v_0 = \frac{V_0 \cdot s}{S} = \frac{5,2 \cdot 8,55}{314} = 0,142 \text{ m par seconde}$$

la surpression maximum dans la conduite de 200 mm sera d'après la théorie d'Allievi :

$$h_0 = \frac{a \cdot v}{g} = 1,73 \text{ kg par cm}^2.$$

Nous pouvons donc considérer que lorsque le diamètre varie dans un tel rapport, le phénomène est peu différent de ce qu'il serait si la conduite de petit diamètre était branchée directement sur un réservoir de grosse capacité. Mais même s'il n'en était pas ainsi, les variations de pression obtenues dans ce cas particulier

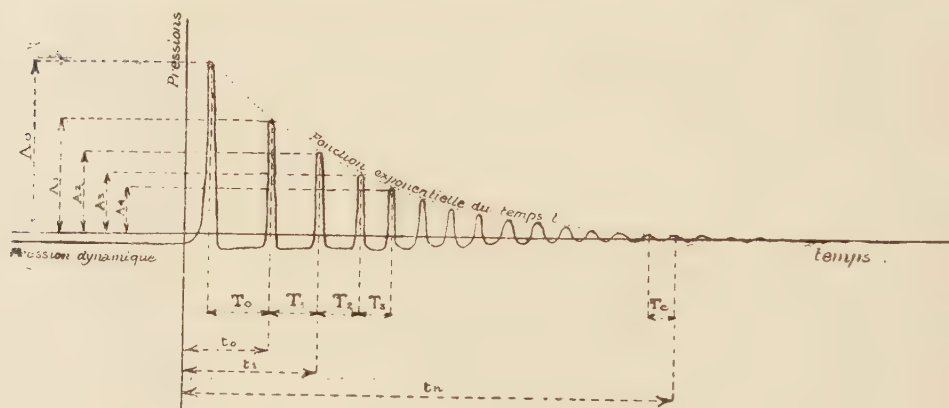


FIG. 21. — Forme générale du coup de bélier dans le cas où la surpression dépasse la pression constante du réservoir

serait intéressantes, puisqu'elles correspondent au cas général des installations de distributions d'eau.

V. *Aspect général des tracés obtenus.* — L'aspect des courbes obtenues avec des conduites linéaires de faible longueur (maximum 30 mètres) est très variable suivant que la surpression initiale dépasse ou non la pression constante du réservoir ($H_0 = 3,6 \text{ kg par cm}^2$).

Lorsque la surpression initiale ne dépasse pas la pression au réservoir, on observe le phénomène classique de coup de bélier prévu par la théorie d'Allievi.

Au contraire, lorsque la surpression initiale dépasse la pression au réservoir, l'aspect des tracés devient tout à fait différent.

Comme on peut s'en rendre compte sur la figure 21, qui reproduit la forme de nos tracés, la courbe enregistrée présente au début des

pointes de pression isolées de très forte amplitude ; pointes dont la durée correspond au temps $2 L/a$ que met la perturbation pour se propager jusqu'au réservoir et revenir dans la section du robinet, à condition que la fermeture du robinet soit instantanée.

Les pointes de pression successives sont séparées par de longs intervalles de temps pendant lesquels la pression reste constante et égale à 1 kilo. Ces intervalles de temps (paliers) vont régulièrement en décroissant au fur et à mesure que l'amplitude des pointes de pression diminue ; le phénomène se rapproche ainsi progressivement d'une oscillation périodique, atteinte seulement vers la fin du tracé. Un tel phénomène semble donc sortir du cadre de ce qui peut être prévu par la théorie classique.

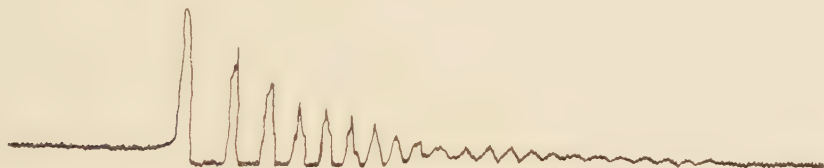


FIG. 21 bis. — Exemple d'enregistrement obtenu sur conduite acier

Pour simplifier les explications qui suivront, nous conviendrons d'appeler « paliers » l'intervalle de temps qui sépare deux pointes de pression successives.

VI. *Lecture des enregistrements. Détermination de l'échelle des tracés.* Sur les tracés on distingue, en lisant de gauche à droite, c'est-à-dire dans le sens du déroulement du papier photographique, une droite horizontale correspondant à la pression de régime statique qui règne avant l'ouverture de la vanne, pression généralement constante. Ce palier est suivi par une baisse de pression très nette, provoquée par l'ouverture de la vanne ; à cette baisse de pression succèdent de faibles oscillations, correspondant au coup de bélier d'ouverture. Ces oscillations s'amortissent très vite et l'on observe ensuite une pression sensiblement constante (on ne distingue généralement que le bruit d'écoulement de l'eau dans la conduite et le robinet), pression constante qui correspond au régime d'écoulement permanent de la conduite.

Enfin la pression monte brusquement en liaison avec la fermeture instantanée de la vanne, c'est alors le phénomène de

coup de bélier de fermeture dont nous avons décrit les phases.

L'amplitude des pointes de pression est d'abord rapidement décroissante, puis décroît plus lentement jusqu'au moment où l'amplitude des pointes de pression devient égale à la pression constante du réservoir augmentée de 1 kilo par centimètre carré, époque à laquelle apparaît une oscillation périodique analogue à celles qui sont prévues par la théorie classique.

Pour la mesure des amplitudes de pression, on évalue l'échelle de pression des tracés de la façon suivante :

Un manomètre à mercure est relié à la conduite par la partie antérieure de la boîte porte-quartz, il permet de mesurer, toutes vannes fermées la pression du réservoir H_0 , et la pression de régime d'écoulement permanent qui correspond à l'ouverture totale de la vanne soit h . La différence $H_0 - h$ qui correspond à la différence d'ordonnée des deux parties droites du tracé spécial servant pour l'étalonnage, donne une valeur de l'échelle de la courbe. Toutefois, on doit préférer à cette méthode, dans le cas où on étudie des coups de bélier de grande amplitude, la méthode plus précise qui suit : on branche sur la conduite à étudier par l'intermédiaire d'une vanne, un accumulateur de pression pouvant donner des pressions connues, par exemple, 10, 20 et 30 kilos par centimètre carré et l'on procède ainsi : on ferme la vanne générale d'alimentation de la conduite, on ouvre la vanne de l'accumulateur et en vidangeant brusquement la conduite par l'ouverture du robinet d'écoulement, on enregistre une baisse brusque de pression de 10, 20 ou 30 kilos jusqu'à la pression atmosphérique ; d'où l'échelle des tracés. En cours de mesure il n'est pas inutile de vérifier que cette échelle ne varie pas après l'enregistrement de plusieurs tracés.

VII. *Interprétation des phénomènes observés.* — Comme nous l'avons indiqué, les phénomènes observés ne semblent pas correspondre aux prévisions de la théorie classique des coups de bélier. La théorie d'Allievi ne prévoit, en effet, que ce qui se passe dans le cas où la surpression initiale ne dépasse pas la pression du réservoir augmentée de la pression atmosphérique et où les oscillations sont symétriques.

Dans nos expériences, au contraire, la surpression initiale dépasse généralement de beaucoup la pression de régime statique et la théorie classique ne peut plus s'appliquer au moins directement.

Le contre-coup de la forte surpression initiale, tend en quelque sorte à faire régner dans la conduite une pression négative. Ceci

explique qu'aussitôt après une pointe de pression, le vide règne dans la conduite. Mais il reste encore à expliquer l'allure pointue et discontinue de la courbe et les longs paliers qui suivent les pointes de pression. Pour interpréter cette forme de courbe, les paliers atteignant une pression voisine du vide et ayant une durée qui va en décroissant en même temps que l'amplitude des pointes de pression, nous avons été conduits à supposer un mouvement d'ensemble de la colonne liquide, qui, sous l'influence de fortes surpressions, se retirerait en laissant un vide derrière elle et reviendrait ensuite en arrière en frappant brutalement le fond de la conduite, rebondirait et ainsi de suite, ce mouvement allant progressivement en s'amortissant.

De pareils chocs sur le fond de la conduite devraient naturellement produire des bruits métalliques audibles, or, il se trouve que, sur nos tracés, on constate la présence de vibrations à fréquence élevée du domaine des vibrations sonores qui viennent se superposer aux pointes de pression et que, de plus, au moment du coup de bélier, on perçoit des bruits métalliques très intenses, bruits évidemment transmis par la paroi de la conduite. Ces bruits se reproduiraient naturellement à chaque nouveau choc sur le fond de la conduite ; on constate en effet qu'à chaque pointe de pression, se superposent des vibrations à fréquence audibles, la percussion se propage dans l'acier de la conduite avec une vitesse environ 4 fois plus grande que la vitesse de propagation dans l'eau, ce qui donne alors des vibrations à fréquence sonore.

Ces oscillations seraient enregistrées par le quartz après transmission par l'eau, puisque le quartz ne peut enregistrer que les phénomènes qui intéressent le milieu liquide. Une confirmation de l'hypothèse formulée ci-dessus consiste dans le fait que, si, en dehors de tout coup de bélier, la conduite ne débitant pas mais restant en charge, on frappe violemment avec un maillet sur le métal de la conduite, on enregistre alors des oscillations à fréquence élevée comparable à celles qui se superposent aux pointes de pression du coup de bélier.

Nous avons réussi, de plus, à obtenir une preuve directe de la réalité de l'hypothèse du retrait en masse de la colonne liquide en procédant de la façon suivante :

Sur la conduite à étudier, nous avons remplacé la boîte porte-quartz par un raccord à quatre directions avec branches à 90° les unes des autres, la conduite et la vanne étant raccordées sur deux

branches opposées, tandis que les deux autres branches sont munies de glaces de verre épais pouvant résister aux surpressions importantes du coup de bélier. On peut ainsi voir ce qui se passe à l'intérieur de la conduite et l'on constate qu'au moment du coup de bélier apparaît un mouvement de recul de l'ensemble de l'eau présente dans la conduite. On peut voir le niveau de l'eau entre les deux glaces baisser et remonter ensuite. Voir le schéma du montage sur la figure 22.

Pour pouvoir apprécier encore plus nettement ce qui se passe à l'intérieur de la conduite nous avons remplacé le raccord à quatre directions par un tube de verre à parois épaisses de 1 m 50 de longueur et de même diamètre intérieur que la conduite. Dans ces

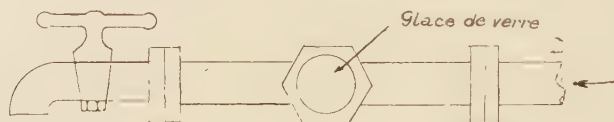


FIG. 22. — Dispositif permettant de déceler le retrait en masse de la colonne liquide

conditions on peut voir, après une fermeture rapide de la vanne la colonne liquide reculer très nettement dans le tube de verre. Avec une conduite de 30 m de longueur et pour une surpression de l'ordre de 60 kilos par cm^2 le recul atteint facilement 20 cm. On voit ensuite la colonne liquide revenir en arrière et frapper brutalement le fond de la conduite, rebondir et ainsi de suite ; au bout de deux ou trois oscillations, suivant l'importance du coup de bélier, l'œil ne distingue plus les allées et venues de l'eau dans la conduite, parce que le retrait de l'eau dure un temps qui devient voisin et ensuite inférieur au dixième de seconde, temps correspondant à la persistance des impressions lumineuses sur l'œil.

Au moment du retrait, des bulles sont visibles au sein de la colonne liquide. Ces bulles sont vraisemblablement dues au dégagement des gaz dissous dans l'eau, dégagement provoqué par la baisse brusque de pression. Ce n'est qu'au bout d'un certain nombre d'oscillations, variable avec l'amplitude initiale de pression, que le retrait de la colonne liquide cesse, quand la pointe de pression ne dépasse plus la pression de régime de la conduite augmentée de la pression atmosphérique, c'est-à-dire au moment où l'oscillation devient périodique.

A) Étude des coups de bélier sur les conduites en acier

Nous avons indiqué précédemment que l'amplitude des pointes de pression décroissait progressivement et que la durée des paliers suivait une loi analogue. On désignera par $T_0, T_1, T_2, \dots, T_n$ les durées des paliers qui séparent les pointes de pressions successives et par $A_0, A_1, A_2, \dots, A_n$, les amplitudes successives correspondantes. Ces deux grandeurs seront fonction du temps t ; des mesures sur les tracés permettront de déterminer ces fonctions dans chaque cas. Après un certain temps, l'oscillation devenant périodique, nous désignerons par T_c la période constante qui lui correspond. Nous désignerons par a la vitesse de propagation des perturbations dans la conduite.

Paliers. — Pour les tracés obtenus avec des conduites en acier, la durée variable T des paliers est fonction exponentielle du temps t c'est-à-dire de la forme :

$$T = T_0 \cdot e^{-\beta t}$$

T_0 étant la durée du palier initial et β étant un coefficient qui dépend des constantes de la conduite.

Amplitude. — Au point de vue de l'amplitude des pointes de pression A , on trouve également une variation suivant une loi exponentielle du temps t de la forme

$$A = A_0 \cdot e^{-\alpha t}$$

A_0 étant l'amplitude initiale et α un coefficient qui dépend des constantes de la conduite. Pour vérifier l'exactitude de ces faits, il suffira de prendre les logarithmes des durées des paliers successifs et des amplitudes des pointes de pression. On portera en abscisse les temps t et en ordonnée ces logarithmes; si les lois de variation sont bien exponentielles, les points seront en ligne droite. Nous donnons ici, à titre d'exemple, la vérification pour trois cas particuliers différents; ce qui montrera bien la généralité de cette propriété.

Prenons l'enregistrement d'un coup de bélier sur tube acier de 33 mm de diamètre intérieur, 42 mm de diamètre extérieur et de 30 mètres de longueur dans une section voisine de la vanne. Les amplitudes successives mesurées sur le tracé, leurs logarithmes et les temps correspondants comptés à partir du premier maximum de pression, sont les suivants.

Amplitudes	Logarithmes	Temps correspondants
$A_0 = 80$ kg	1,90309	0 seconde
$A_1 = 61$ —	1,78533	0,41 —
44 —	1,64345	0,70 —
35 —	1,54407	0,95 —
30 —	1,47712	1,16 —
26 —	1,41497	1,35 —
23 —	1,36173	1,52 —
19 —	1,27875	1,67 —
18 —	1,25527	1,80 —
16 —	1,20412	1,92 —
15 —	1,17609	2,03 —
13 —	1,11394	2,14 —
12 —	1,07918	2,25 —
11 —	1,04139	2,355 —
9 —	0,95424	.
8,5 —	0,92942	.
8 —	0,90309	.

Les durées des paliers et leurs logarithmes sont alors :

Durée des paliers successifs	Logarithmes correspondants	Durée des paliers successifs	Logarithmes correspondants
$T_0 = 0,41$ seconde	$\bar{1},61278$	0,12 seconde	$\bar{1},07918$
$T_1 = 0,30$ —	$\bar{1},47712$	0,115 —	$\bar{1},06070$
0,25 —	$\bar{1},39794$	0,11 —	$\bar{1},04139$
0,21 —	$\bar{1},32222$	0,10 —	$\bar{1},00000$
0,18 —	$\bar{1},25527$	0,10 —	$\bar{1},00000$
0,17 —	$\bar{1},23045$	0,10 —	$\bar{1},00000$
0,15 —	$\bar{1},17609$	0,095 —	$\bar{2},97772$
0,13 —	$\bar{1},11394$	0,095 —	$\bar{2},97772$

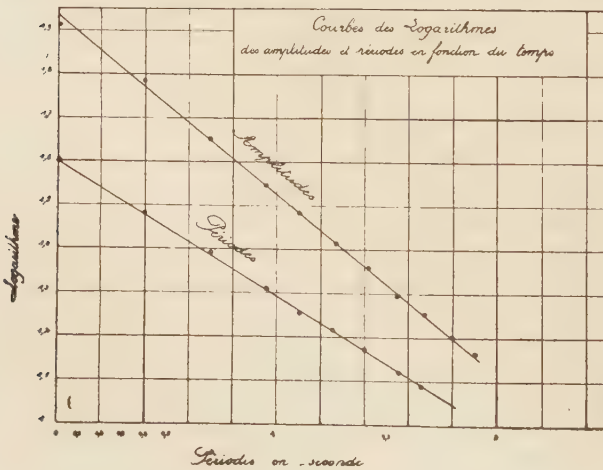


FIG. 23
Courbe des logarithmes des amplitudes et des durées des paliers en fonction du temps.

Voir figure 23 les droites correspondantes.

Prenons ensuite l'enregistrement d'un coup de bélier sur tube acier de 20 mm de diamètre intérieur, de 27 mm de diamètre extérieur et de 30 mètres de longueur, dans une section voisine de la vanne.

Les amplitudes successives mesurées sur le tracé, leurs logarithmes et les temps correspondants sont indiqués dans le tableau suivant :

Amplitudes	Logarithmes	Temps correspondants
50 kg	1,69897	0 seconde
38 —	1,57978	0,23 —
33 —	1,51851	0,44 —
26 —	1,41497	0,61 —
24 —	1,38021	0,765 —
20 —	1,30103	0,915 —
18 —	1,25527	1,045 —
16 —	1,20412	1,170 —
15 —	1,17609	1,285 —
13,5 —	1,13033	1,395 —
12,5 —	1,09691	1,500 —
12 —	1,07918	.
11 —	1,04139	.
10 —	1,00000	.
9 —	0,95424	.
7,5 —	0,87506	.
5,5 —	0,74036	.
5 —	0,69897	.
5 —	0,69897	.

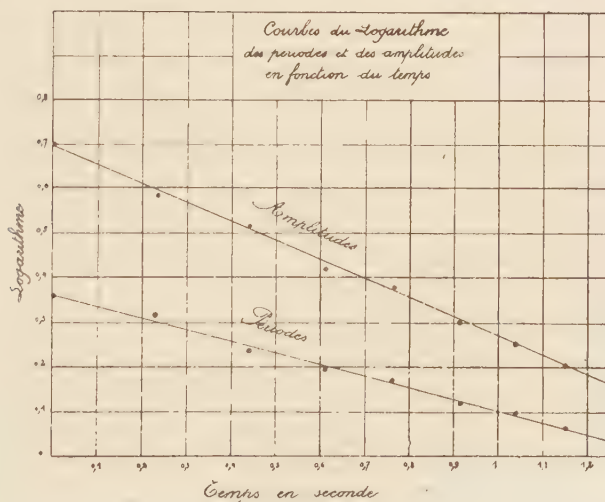


FIG. 24

Même courbe
pour un coup de
bélier sur conduite
acier 20/27 ; lon-
gueur 30 mètres.

Les durées des paliers successifs et leurs logarithmes sont :

Durée des paliers successifs	Logarithmes correspondants	Durée des paliers successifs	Logarithmes correspondants
0,230 seconde	1,36173	0,115 seconde	1,06070
0,210 —	1,32222	0,110 —	1,04139
0,170 —	1,23045	0,105 —	1,02119
0,155 —	1,19033	0,100 —	1,00000
0,150 —	1,17609	0,100 —	1,00000
0,130 —	1,11394	0,095 —	2,97772
0,125 —	1,09691	0,095 —	2,97772

Voir figure 24 les droites correspondantes.

Prenons enfin l'enregistrement d'un coup de bélier sur tube acier de 20 mm de diamètre intérieur, identique au précédent, mais dont la longueur a été réduite à 20 mètres. On a ainsi :

Amplitudes	Logarithmes	Temps correspondants
70 kg	1,84510	0 seconde
50 —	1,69897	0,265 —
38 —	1,57978	0,475 —
31 —	1,49136	0,655 —
26 —	1,41497	0,820 —
21 —	1,32222	0,965 —
18 —	1,25527	1,105 —
15 —	1,17609	1,223 —
13,5 —	1,13033	1,336 —
12 —	1,07918	1,444 —
10 —	1,00000	1,549 —
9 —	0,95424	1,649 —
8 —	0,90309	etc.
7 —	0,84510	

Les durées des paliers successifs sont alors :

Durée des paliers successifs	Logarithmes correspondants	Durée des paliers successifs	Logarithmes correspondants
0,265 seconde	1,42325	0,113 seconde	1,05308
0,210 —	1,32222	0,108 —	1,03342
0,180 —	1,25527	0,105 —	1,02119
0,165 —	1,21748	0,100 —	1,00000
0,145 —	1,16137	0,095 —	2,97772
0,140 —	1,14613	0,090 —	2,95424
0,118 —	1,07188	0,085 —	2,92942

Voir les droites figuratives à la figure 25.

Amortissement des oscillations. — Nous avons vu que les pointes

de pression avaient une amplitude qui décroît suivant une loi exponentielle de la forme :

$$A_n = A_0 e^{-\alpha t}$$

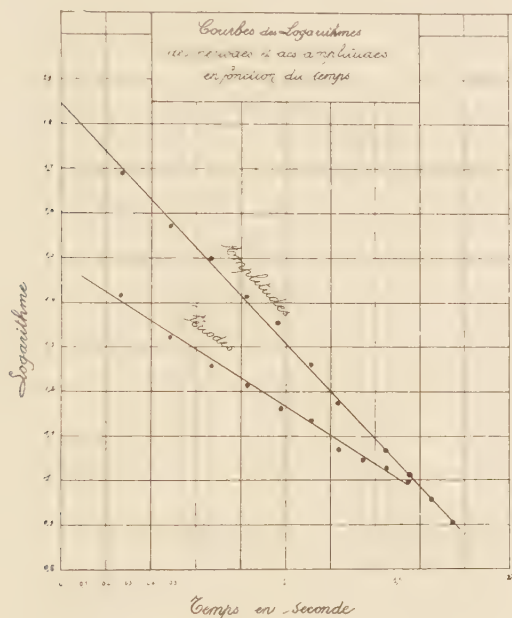


FIG. 25. — Même courbe pour un coup de béliet sur conduite acier 20/27 de 20 mètres de longueur

La durée du palier est elle-même décroissante suivant une loi analogue :

$$T_n = T_0 e^{-\beta t}$$

Cette durée n'étant pas constante, l'amortissement des pointes de pression ne pourra plus être défini de la même façon que l'amortissement d'oscillations sinusoïdales habituelles.

Ici, l'amortissement des oscillations ne pourra plus être défini que par le coefficient α qui intervient dans l'expression de l'amplitude.

Relations entre les coefficients α et β . — Il y a lieu de chercher s'il n'existe pas une relation entre les coefficients α et β qui déterminent les variations de l'amplitude et les durées des paliers en fonction du temps. Ceci revient à déterminer la loi de variation de l'amplitude A_n en fonction de la durée T_n correspondante. Cette détermination a été faite pour des coups de béliet obtenus dans des

conditions différentes de façon à vérifier la généralité de la relation. En particulier, pour des tracés obtenus sur des conduites de 3 diamètres différents :

Conduite de 33/42 mm de 30 mètres de longueur,

—	30/27	—	20	—
—	8/13	—	20	—

Comme on peut le constater sur les figures représentatives 26 et 27, ces courbes sont sensiblement des droites, quelles que soient

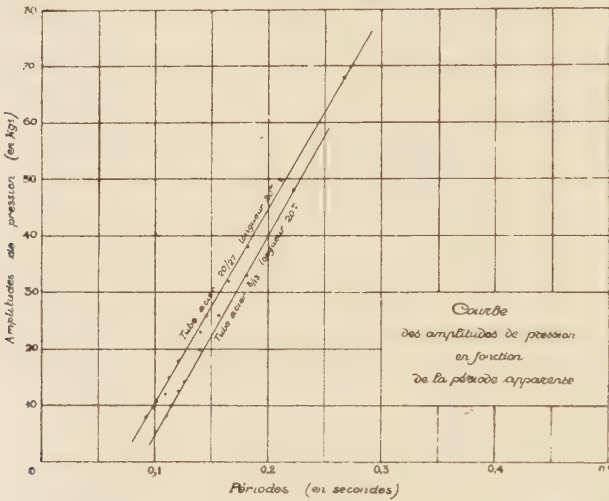


FIG. 26. — Courbes de l'amplitude du coup de béliér en fonction de la durée des paliers avec des conduites de diamètres différents

les constantes de la conduite, d'où A/T sensiblement constant. On en déduit :

$$\alpha \text{ sensiblement égal à } \beta.$$

Les courbes montrent que l'inclinaison des droites logarithmiques des durées des paliers successifs n'est pas rigoureusement identique à l'inclinaison de la droite logarithmique des amplitudes correspondantes. Comme nous venons de le voir, le rapport A/T est sensiblement constant pour les différentes pointes de pression d'un même coup de béliér, il est également constant pour une même longueur de conduite, quelle que soit la loi de fermeture (voir fig. 26 et 27). Autrement dit, pour une même conduite ou pour deux conduites identiques, quelle que soit la loi de fermeture,

à amplitude égale on a un palier de durée égale ; les légères différences constatées sur certaines courbes sont dues certainement à une mauvaise purge de la conduite. Une petite quantité d'air présente dans la conduite suffit à modifier considérablement les périodes apparentes.

Variation de l'amplitude et de la durée des paliers du coup de bélier en fonction de la longueur de la conduite. — La difficulté de cette étude réside dans le fait que l'intensité d'un coup de bélier dépend d'un grand nombre de variables. Elle dépend en particulier, de la

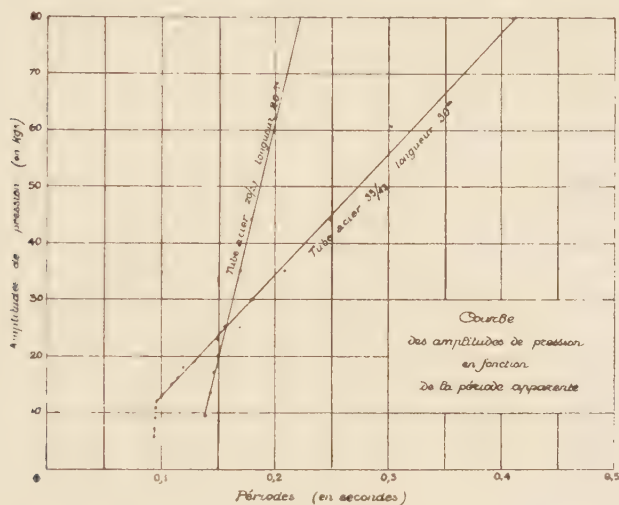


FIG. 27. — Même courbe avec des conduites de longueurs différentes

vitesse de l'eau dans la conduite, de la loi de fermeture et de la longueur de la conduite. Si l'on désire étudier la loi de variation du coup de bélier en fonction d'une seule de ces variables, il faudra s'assurer que toutes les autres variables restent constantes.

En particulier, pour étudier les variations du coup de bélier en fonction de la longueur de la conduite, il sera nécessaire d'utiliser un dispositif permettant de reproduire à volonté la même loi de fermeture du robinet. Une fermeture du robinet exécutée à la main ne permet pas d'obtenir une régularité quelconque ; il a été constaté qu'un opérateur ne peut absolument pas reproduire à volonté deux fermetures identiques à la suite, les temps de fermeture ainsi obtenus variant entre 2/10 et 5/10 de seconde, sans qu'on puisse constater de différence nette à l'œil. Dans le but

d'obtenir à volonté des vitesses de fermeture identiques, nous avons réalisé un appareil automatique très simple. Ce dispositif se compose d'un robinet à boisseau fermant en un quart de tour, muni d'un levier en acier portant à une distance déterminée de l'axe du robinet une grosse masse de plomb. Cet ensemble formant pendule, permet d'obtenir des temps de fermeture constants si l'on a la précaution de lâcher le levier d'une hauteur constante, déterminée par l'emploi d'un crochet maintenant le levier dans la position horizontale, position d'ouverture complète du robinet. En manœuvrant le crochet, on libère le levier, ce qui provoque la fermeture suivant une loi bien déterminée. Il reste, si l'on veut avoir réellement la variation du coup de bélier en fonction de la longueur de la conduite seule, à s'assurer de la constance de la vitesse d'écoulement de l'eau. Mais on sait que lorsque la longueur de la conduite varie, la perte de charge dans la conduite varie également. Par suite, à pression d'alimentation égale, la vitesse d'écoulement de l'eau variera lorsqu'on modifiera la longueur de la conduite. Il sera donc pratiquement impossible d'avoir les variations du coup de bélier en fonction de la longueur de la conduite seule. Toutefois, on pourra déduire de ces expériences la variation réelle du coup de bélier en fonction de la longueur de la conduite à condition de noter les débits correspondants à chaque expérience et de connaître la loi de variation du coup de bélier avec le débit de la conduite.

L'expérience montre, comme nous le verrons plus loin, que l'intensité du coup de bélier est proportionnelle au débit de la conduite. En plaçant un robinet de 15 mm sur une conduite de 20/27 mm, les pertes de charge dues à la conduite sont relativement faibles par rapport aux pertes de charge dans le robinet. Ces conditions permettront de diminuer l'écart sur la vitesse d'écoulement entre les différentes expériences.

Avec cette conduite, nous avons effectué trois séries d'expériences :

1^o La conduite ayant une longueur de 10 mètres, débit de la conduite : 1,850 litres par seconde ; vitesse d'écoulement : 5,90 mètres par seconde, fermeture automatique avec masse de plomb fixée au septième trou du levier, temps de fermeture de 2/10 de seconde environ. Le premier maximum de pression du tracé qu'on obtient dans ces conditions correspond en moyenne à 16 kilos par centimètre carré. L'amortissement des oscillations est rapide, temps d'amortissement total 1 seconde environ ;

2° La longueur de la conduite étant portée à 20 mètres ; débit de la conduite : 1,55 litres par seconde ; vitesse d'écoulement : 4,95 mètres par seconde. Le premier maximum de pression correspond à 30 kilos en moyenne avec les mêmes conditions de fermeture. Le coup de bélier ramené à une même vitesse d'écoulement, sera :

$$30 + 16 \% = 34,8 \text{ kg par cm}^2$$

Temps d'amortissement total des oscillations : 2 secondes ;

3° La longueur de la conduite est enfin portée à 30 mètres ; débit de la conduite : 1,275 litre par seconde ; vitesse d'écoulement : 4,05 mètres par seconde. Temps d'amortissement total des oscillations : 2,8 secondes. Le premier maximum correspond à 40 kilos en moyenne. Le coup de bélier ramené à une même vitesse d'écoulement est :

$$40 + 31,5 \% = 52,5 \text{ kg par cm}^2$$

Autre série d'expériences. — Avec la conduite acier de 33/42 mm de diamètre, trois séries d'enregistrements ont été exécutées. Le temps de fermeture était de 3/10 de seconde environ.

1° La conduite ayant 10 mètres de longueur ; débit de la conduite : 6,33 litres par seconde ; vitesse d'écoulement : 7,40 mètres par seconde. Temps d'amortissement total des oscillations : 1,1 seconde. Le premier maximum correspond en moyenne à 15 kilos par centimètre carré ;

2° La conduite ayant 20 mètres de longueur ; débit de la conduite : 5 litres par seconde ; vitesse d'écoulement : 5,85 mètres par seconde. Temps d'amortissement total des oscillations : 2,2 secondes. Le premier maximum de pression correspond à 28 kilos en moyenne, le coup de bélier ramené à une même vitesse d'écoulement est :

$$28 + 21 \% = 33,90 \text{ kg}$$

3° La conduite ayant 30 mètres de longueur ; débit de la conduite : 4,415 litres par seconde ; vitesse d'écoulement : 5,175 mètres par seconde. Temps d'amortissement total des oscillations : 3 secondes. Le premier maximum correspond en moyenne à 38 kilos ; le coup de bélier ramené à une même vitesse d'écoulement est :

$$38 + 30 \% = 49,40 \text{ kg.}$$

En résumé, d'après les chiffres précédents, on peut dire qu'à débit égal l'intensité du coup de bélier est proportionnelle à la longueur de la conduite ; par contre l'amortissement des oscillations est inversement proportionnel à cette longueur.

Périodes finales des oscillations. Vitesse de propagation des perturbations. — Après un certain temps, les variations de pression du coup de bélier deviennent périodiques, puis se modifient progressivement pour devenir enfin sensiblement sinusoïdales. Désignons par T_c leurs périodes. Pour évaluer cette période, il faut considérer qu'elle se trouvera définie par l'intermédiaire du temps mis par la perturbation pour parcourir toute la longueur de la conduite, aller et retour, soit $2\tau = 2L/a$. Comme la réflexion se fait au réservoir avec changement de signe, la longueur d'onde de ces oscillations correspond à 4 fois la longueur de la conduite, d'où :

$$\lambda_c = 4 \cdot L$$

On aura, si a représente la vitesse de propagation des perturbations, une oscillation finale conforme à la théorie classique des coups de bélier dont la période est :

$$T_c = \frac{4 \cdot L}{a}$$

d'où la valeur de la vitesse de propagation :

$$a = \frac{4 \cdot L}{T_c}$$

On pourra alors comparer la vitesse de propagation calculée d'après les résultats expérimentaux et la vitesse obtenue suivant la formule donnée par Allievi :

$$a = \frac{9.900}{\sqrt{48,3 + k \frac{d}{e}}}$$

Dans cette formule k est un coefficient numérique qui varie avec la nature de la conduite :

$k = 0,5$ pour l'acier $k = 1$ pour la fonte $k = 5$ pour le plomb.

Les lettres d et e représentent le diamètre et l'épaisseur de la conduite. Ainsi pour la conduite acier de 33/42 mm de diamètre, la vitesse de propagation, calculée d'après la formule précédente serait :

$$a = 1.375 \text{ m par seconde.}$$

De même, pour la conduite de 20/27 mm cette vitesse serait :

$$a = 1,385 \text{ m par seconde,}$$

et pour la conduite de 8/12 mm on aurait enfin :

$$a = 1,405 \text{ m par seconde.}$$

Expérimentalement, il est difficile d'obtenir une bonne détermination de la vitesse de propagation des perturbations du fait qu'une petite quantité d'air résiduelle dans la conduite modifie considérablement la longueur d'onde de l'oscillation finale, ce qui fausse la détermination. Il est donc nécessaire avant tout, de bien purger

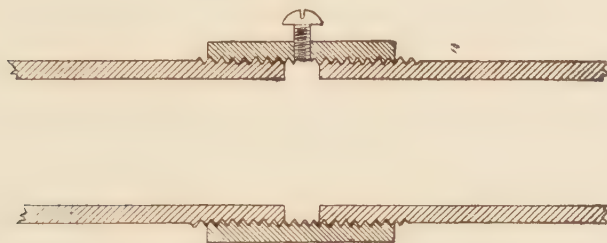


FIG. 28

Coupe du raccord, entre éléments de conduite d'acier
permettant une purge d'air rapide

d'air la conduite. Pour mener à bien cette opération, il est indispensable d'éviter dans le profil intérieur de la conduite des logements où peuvent s'enfermer des bulles d'air. A cet effet, il est très commode d'utiliser pour assembler les divers éléments de la conduite des raccords spéciaux.

Ces raccords spéciaux du type préconisé par M. Camichel, sont constitués par un manchon fileté simple pourvu d'un trou également fileté qu'on peut obturer par une vis avec rondelle de plomb formant joint étanche. Ce dernier dispositif permet de parfaire la purge de la conduite, en éliminant les dernières bulles d'air emprisonnées dans les filets des raccords (fig. 28). Malgré ces précautions il est difficile d'obtenir une purge parfaite, mais on accélère ainsi le départ de l'air contenu dans la conduite. C'est à une purge incomplète que l'on doit imputer l'allongement de la période que l'on constate sur certains enregistrements. Ces difficultés suffisent à expliquer que l'accord

ne soit pas parfait entre l'expérience et la théorie. On trouve en effet :

Pour la conduite acier de 33/42 mm, les périodes suivantes :

3,2	centièmes de seconde	pour 10 mètres de longueur,
6,1	—	— 20 —
9,25	—	— 30 —

Ces valeurs de la période correspondent à une vitesse de propagation :

$$a = 1.300 \text{ m environ.}$$

Pour la conduite acier de 20/27 mm les périodes sont :

3,1	centièmes de seconde	pour 10 mètres de longueur,
6,25	—	— 20 —
9,5	—	— 30 —

Ces valeurs de la période correspondent à une vitesse de propagation :

$$a = 1.270 \text{ m environ.}$$

Il semble donc que l'accord avec la théorie soit moins bon lorsque le diamètre décroît. Ceci peut s'expliquer par le fait que les quantités d'air résiduelles sont relativement beaucoup plus importantes pour

les conduites de petit diamètre que pour des conduites de plus gros diamètre.

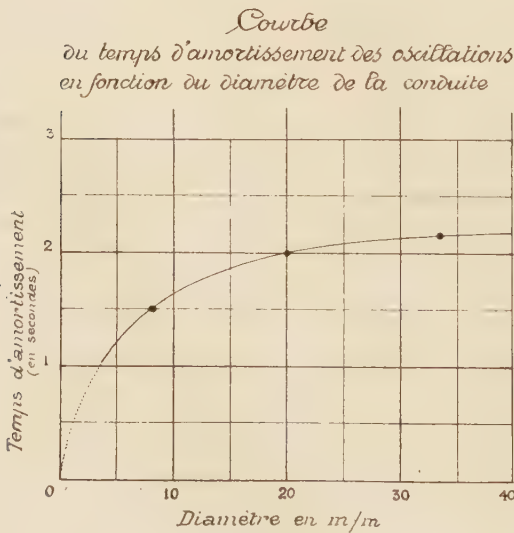


FIG. 29

Variations du temps d'amortissement des oscillations en fonction du diamètre de la conduite

Variations des caractéristiques du coup de bélier en fonction du diamètre de la conduite. — Si le diamètre de la conduite varie seul, c'est-à-dire si on opère sur plusieurs conduites avec la même pression d'alimentation, le même temps de fermeture, la même vitesse d'écoulement et la même longueur de conduite, on cons-

tate que l'amplitude du coup de bélier et, par conséquent la durée du palier qui suit la première pointe de pression ne varient sensiblement pas. L'influence de la variation du diamètre ne se fait visiblement sentir, dans les limites entre lesquelles nous avons pu faire varier ce diamètre, que sur l'amortissement des oscillations.

L'amortissement des pointes de pression augmente nettement lorsque le diamètre décroît. On appréciera commodément la loi suivant laquelle la variation s'effectue en considérant le temps d'amortissement total des oscillations. On a ainsi avec les conduites en acier que nous avons utilisées :

Diamètres intérieurs	Temps d'amortissement total
8 mm	1,5 seconde
20 —	2 —
33 —	2,2 —

On peut voir sur la figure 29 qui traduit ce tableau, que lorsque le diamètre augmente le temps d'amortissement des oscillations augmente. L'augmentation du temps d'amortissement est d'abord rapide, c'est-à-dire que l'amortissement diminue d'abord rapidement, puis semble tendre ensuite vers une valeur limite qui correspondrait à l'amortissement dans des conduites de très gros diamètres.

Variations des caractéristiques du coup de bélier en fonction de la loi de fermeture. — L'amplitude du coup de bélier varie considérablement avec la loi de fermeture, c'est-à-dire, si la loi de fermeture est supposée linéaire, avec la vitesse de fermeture. L'étude de ces variations nécessite l'emploi d'une méthode simple permettant la mesure exacte des temps de fermeture. La méthode que nous avons utilisée repose sur l'emploi d'un galvanomètre balistique parcouru par un courant constant pendant la durée du temps à mesurer. On sait que pour des valeurs convenables de courant, la déviation du galvanomètre balistique sera proportionnelle à la quantité d'électricité qui l'a traversé, c'est-à-dire proportionnelle au temps qu'on veut mesurer. Il est toutefois nécessaire que le temps à mesurer soit petit par rapport à la période propre du galvanomètre employé. Le montage utilisé correspond pratiquement au schéma suivant :

Le corps du robinet quart de tour employé (loi de fermeture linéaire en fonction de l'angle de rotation) porte un plateau en

ébonite sur lequel est fixé un contact en cuivre de forme annulaire ; un balai en cuivre rouge solidaire du boisseau du robinet vient frotter sur ce contact. Le balai est calé et le contact annulaire est limité de façon que le passage du courant soit assuré pendant le temps exact de la fermeture du robinet. Le courant constant est réglé à la valeur voulue par une résistance variable R mise en série avec l'appareil de mesure (galvanomètre balistique ou mieux fluxmètre). De plus cet

appareil de mesure est shunté par une résistance convenable s . (Voir le schéma de montage fig. 30.) L'appareil de mesure sera parcouru par un courant constant pendant le temps de la fermeture et sa déviation sera proportionnelle à cette durée.

Donc, si la force électromotrice de la pile d'alimentation du circuit ne change pas durant les mesures, on pourra avoir directement les temps de fer-

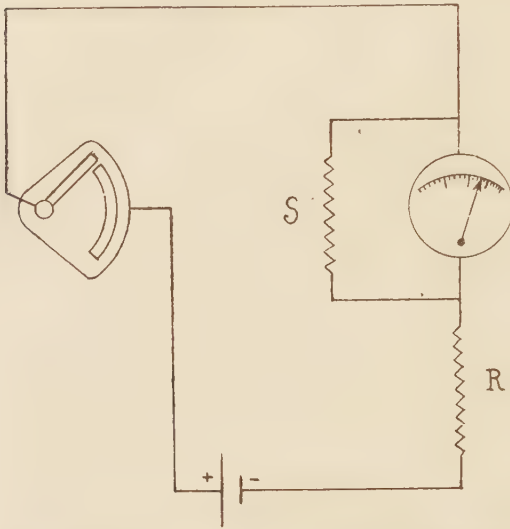


FIG. 30. — Montage électrique permettant la mesure du temps de fermeture de la vanne par simple lecture de la déviation d'un balistique

mure à partir de la déviation du fluxmètre, à condition d'avoir déterminé le coefficient de proportionnalité de la déviation au temps. Il est préférable d'employer un fluxmètre plutôt qu'un galvanomètre, car le fluxmètre présente sur le galvanomètre l'avantage de ne pas avoir de couple de rappel et de conserver par la suite la déviation à lire. On détermine le coefficient de proportionnalité de la déviation au temps de la façon suivante :

Le dispositif décrit plus haut est modifié en fixant au boisseau du robinet un second balai de cuivre isolé électriquement du premier. Ce second balai frotte sur un autre contact circulaire de façon que ce deuxième contact soit également établi pendant le temps exact de la fermeture. Ce deuxième contact est utilisé pour faire passer un courant dans l'oscillographe pendant le temps de fermeture à mesurer.

On obtient un tracé en palier qui permet de déterminer exactement ce temps. Cette détermination faite pour différentes fermetures permet d'obtenir une mesure du coefficient de proportionnalité. Les déterminations de la variation du coup de bélier en fonction de la loi de fermeture ont porté sur trois séries d'enregistrements obtenus avec trois robinets de diamètres différents : 33 mm, 20 mm et 15 mm montés sur une conduite de 33/42 mm.

1^o Expériences avec un robinet quart de tour de 33 mm monté sur une conduite de 33/42 mm de 30 mètres de longueur :

Nous avons réalisé un certain nombre de temps de fermeture différents soit par des fermetures à la main, soit à l'aide du dispositif automatique. Les résultats obtenus sont :

Temps de fermeture	Amplitude maximum de pression
0,20 seconde	55 kg
0,21 —	50 —
0,23 —	44 —
0,35 —	32 —
0,50 —	26 —
0,57 —	23,5 —
0,92 —	18,5 —

Les coups de bélier figurant dans ce tableau ont été obtenus avec une vitesse d'écoulement dans la conduite de 5,80 mètres par seconde.

La courbe qui traduit ce tableau est analogue à une hyperbole équilatère ; voir cette courbe, figure 31.

2^o Expériences avec un robinet quart de tour de 200 mm monté sur la même conduite de 33/42 mm et 30 mètres de longueur. Conditions de fermeture analogues. Les résultats obtenus sont alors :

Temps de fermeture	Amplitude maxima de pression
0,110 seconde	57 kg
0,140 —	44 —
0,160 —	41,5 —
0,165 —	38,5 —
0,335 —	20,5 —
0,345 —	20 —
0,375 —	18,5 —
0,650 —	10 —
0,850 —	6 —

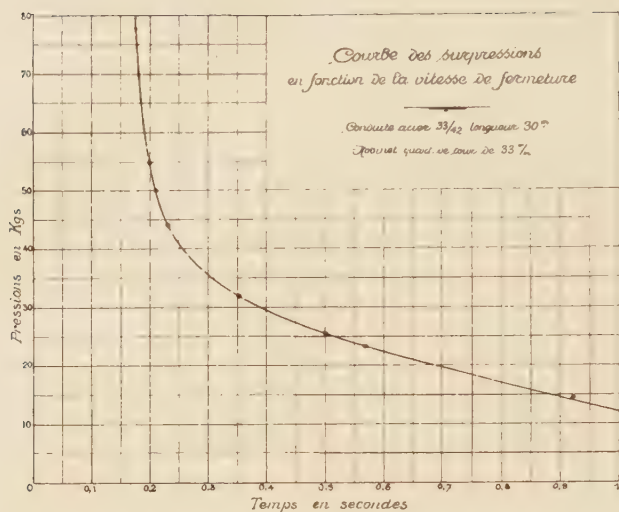


FIG. 31
Variations de l'amplitude de la première pointe de pression
en fonction du temps de fermeture, avec vanne de 33 $\frac{m}{m}$

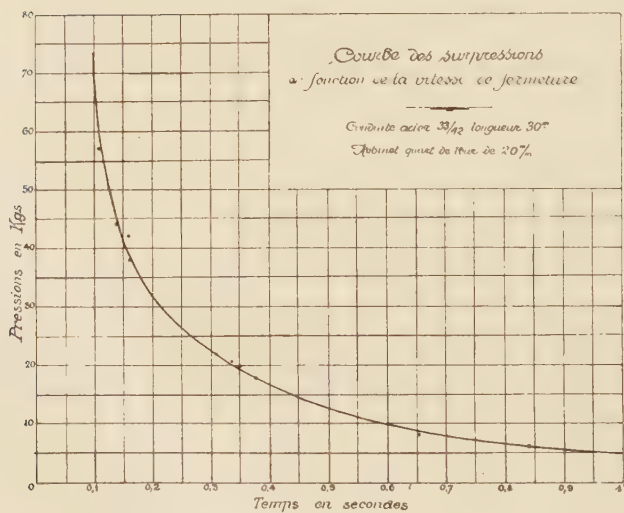


FIG. 32
Variations de l'amplitude de la première pointe de pression
en fonction du temps de fermeture, avec vanne de 20 $\frac{m}{m}$

Les coups de bélier figurant dans ce tableau ont été obtenus avec une vitesse d'écoulement dans la conduite de 3,35 mètres par seconde.

La courbe qui traduit ce tableau est analogue à la précédente comme on peut le voir figure 32.

3^o Expériences avec un robinet quart de tour de 15 mm, monté sur la même conduite. Conditions de fermeture analogues. Les résultats obtenus sont :

Temps de fermeture	Amplitude maxima de pression
0,106 seconde	50 kg
0,166	33
0,197	27
0,213	26,4
0,245	20,4
0,371	16,4
0,450	13

Les coups de bélier figurant dans ce tableau ont été obtenus avec une vitesse d'écoulement dans la conduite de 3 mètres par seconde.



FIG. 33. — Mêmes variations de l'amplitude de la première pointe de pression mais avec vanne de 15 $\frac{m}{m}$

Voir figure 33 la courbe qui traduit ce tableau. Elle présente la même allure que les deux courbes précédentes.

Il est remarquable que les trois courbes précédentes obtenues avec des robinets de diamètres différents, c'est-à-dire avec des débits différents, présentent la même forme. La loi de variation de l'amplitude du coup de bélier en fonction du temps de fermeture sera apparemment la même quel que soit le débit de la conduite. La variation du temps de fermeture n'influe pas sur les périodes apparentes ; à amplitude égale on retrouve une période apparente égale.

Variations des caractéristiques du coup de bélier en fonction du débit de la conduite. — Comme il est pratiquement difficile de réaliser à volonté des temps de fermeture identiques avec des robinets différents, il est commode, pour étudier la variation de l'amplitude du coup de bélier en fonction du débit de la conduite, d'utiliser les courbes précédentes. Ces courbes permettent en effet d'obtenir l'amplitude du coup de bélier pour trois valeurs différentes du débit à temps de fermeture égale et ceci pour un grand nombre de valeurs possibles du temps de fermeture en comparant les amplitudes obtenues pour les différents débits avec une même vitesse de fermeture. On constate facilement ainsi : que l'amplitude initiale est proportionnelle au débit, c'est-à-dire à la vitesse de l'eau dans la conduite. En effet, si l'on prend, d'après les résultats précédents, les amplitudes obtenues pour différentes vitesses de fermetures avec les trois robinets de 33, 20 et 15 mm on trouve :

Temps de fermeture	Intensité du coup de bélier		
	Robinet 33 mm Débit : 4,90 l Vitesse : 5,80 m	Robinet 20 mm Débit : 2,85 l Vitesse : 3,35 m	Robinet 15 mm Débit : 2,50 l Vitesse : 3 m
0,15 seconde		43 kg	38 kg
0,20 —	55 kg	32 —	27 —
0,30 —	35 —	22 —	19 —
0,40 —	29,8 —	16,8 —	14,2 —
0,50 —	26 —	13 —	11,5 —

On obtient, en considérant les rapports des amplitudes pour un même temps de fermeture, 0,20 seconde par exemple :

$$\frac{55}{32} = \frac{5,80}{3,35} = 1,72$$

et : $\frac{32}{27} = \frac{3.35}{3} = 1,15$ environ

On voit facilement que les amplitudes sont proportionnelles aux vitesses d'écoulement dans la conduite. Enfin, les durées des paliers suivent la même loi de variation que l'amplitude maximum.

Influence de la présence d'air dans la conduite. —

La présence d'air dans la conduite est une condition fréquente dans la pratique, comme nous l'avons indiqué, cette présence d'air est due le plus souvent à une purge incomplète de la conduite et il est assez difficile pratiquement de faire disparaître les dernières bulles d'air contenues dans la conduite. Pour apprécier l'influence de la présence d'air dans la conduite, il était nécessaire avant tout d'obtenir des tracés sans trace d'air dans la conduite ni rentrées d'air au cours des oscillations. Dans ce but, comme il a été indiqué, nous avons utilisé pour relier chaque élément de conduite, des raccords spéciaux permettant la purge, du type préconisé par M. Camichel ; de plus pour éviter les rentrées d'air possibles au cours des oscillations, les joints convenablement vérifiés (absence totale de fuite d'eau) sont enduits de plusieurs couches de vernis à l'acétate de cellulose. Il est ainsi peu probable, une fois la conduite totalement purgée, qu'il puisse se faire des rentrées d'air pendant le temps relativement court où une dépression règne dans la conduite. Dans ces conditions, on obtient des tracés où, aux oscillations que nous avons décrites, se superposent des vibrations à fréquence sonore. Nous avons étudié alors l'influence des quantités d'air connues introduites systématiquement dans la conduite. Sur les tracés obtenus dans ces conditions, on constate que :

1^o La présence d'air dans la conduite supprime presque totalement, ou totalement, suivant la quantité d'air introduite, les vibrations à fréquence élevée ; 2^o la présence d'une quantité d'air importante dans la conduite a pour effet de modifier considérablement la fréquence des oscillations ; elle diminue la fréquence des oscillations périodiques, mais augmente

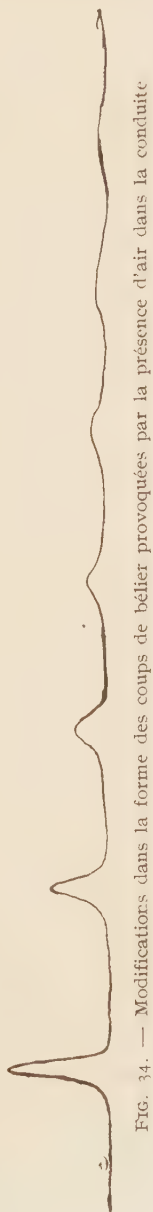


FIG. 34. — Modifications dans la forme des coups de bélier provoquées par la présence d'air dans la conduite

la durée des pointes de pression. On constate en particulier que la présence d'environ $1/30$ du volume total de la conduite d'air admis dans celle-ci a pour effet de doubler la période des oscillations ; en même temps les pointes de pression s'arrondissent très nettement, comme on peut le voir sur la figure 34.



FIG. 35. — Modifications dans la forme des coups de béliet provoquées par la présence d'une fuite sur la conduite

Influence d'une fuite en un point voisin de la vanne sur les caractéristiques du coup de béliet. — Pour étudier l'influence d'une fuite sur la forme du coup de béliet obtenu, des fuites de débits très variables ont été systématiquement réalisées. Les fuites étaient provoquées au voisinage de la vanne, position où l'action obtenue est maximum. L'importance de la fuite a varié de une fraction de litre à l'heure à 500 litres à l'heure environ. Une faible fuite de quelques gouttes à la seconde c'est-à-dire de l'ordre du litre à l'heure n'a pas d'action visible sur les caractéristiques du coup de béliet, ce qui semble montrer que, dans ces conditions, il ne se fait pas de rentrée d'air importante. Au contraire, une fuite plus considérable augmente l'amortissement des oscillations et tend à rendre la conduite apériodique, ce qui a lieu pour un débit de la fuite de l'ordre de grandeur du débit du robinet qui produit le coup de béliet. La durée des paliers diminue plus vite à amplitude de pression initiale égale dès que la fuite devient un peu considérable. L'amplitude des pointes de pression est nettement réduite lorsque la fuite devient de l'ordre d'une centaine de litres

à l'heure. En même temps des variations de pression à fréquence sonore apparaissent de façon quasi constante ; elles sont dues à l'écoulement de l'eau par l'ouverture que provoque la fuite, car elles persistent lorsque tout coup de béliet a disparu. Voir figure 35 un exemple d'enregistrement avec fuite.

Étude des coups de bélier dans une conduite non linéaire et à caractéristiques multiples. — L'étude des coups de bélier dans les conduites munies de coudes et à caractéristiques multiples présente un intérêt théorique et pratique tout particulier.

En effet, dans les installations hydrauliques de tout genre, on a presque toujours à considérer des canalisations à caractéristiques multiples avec des coudes, branchements et raccords divers. Nous avons cherché à schématiser une installation hydraulique en branchant sur une conduite rectiligne d'acier un piquage constitué par une canalisation de diamètre inférieur à celui de la conduite. Le montage utilisé était le suivant : une conduite en acier de 33/42 mm de diamètre et 30 mètres de longueur portant un piquage en tube

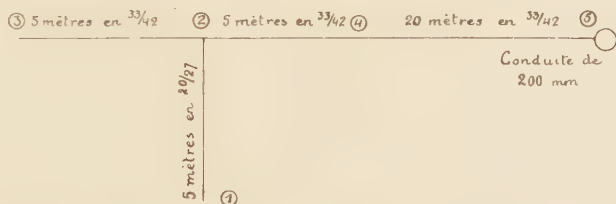
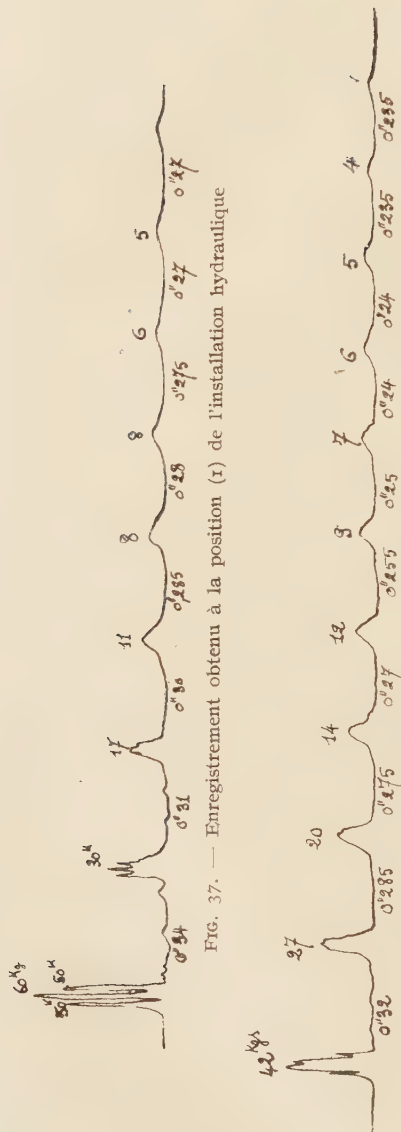


FIG. 36. — Montage d'éléments de conduite réalisant le schéma d'une installation hydraulique

d'acier de 20/27 mm de diamètre et 5 mètres de longueur placé à angle droit avec la conduite principale et à 25 mètres de son origine ; l'ensemble était conforme au schéma indiqué figure 36. Un robinet à boisseau quart de tour était placé à l'extrémité du piquage, c'est-à-dire en (1). Afin que la vitesse de fermeture reste constante d'une expérience à l'autre, le robinet était commandé par le dispositif automatique décrit précédemment. Des enregistrements ont été exécutés en plaçant le quartz dans les plans correspondant aux positions (1) (2) (3) (4) et (5) indiquées sur le schéma.

A la position (1) on obtient un tracé sur lequel on retrouve nettement les fréquences propres des deux tronçons de conduite constituant la conduite coudée, à savoir la fréquence propre d'un tuyau de 5 mètres et celle d'un tuyau de 25 mètres de longueur. Enfin, on trouve également une fréquence d'ensemble de la conduite qui semble diminuée du fait de l'existence du coude. Au point de vue de l'amplitude, elle ne semble que faiblement réduite du fait de la présence du coude, tout au moins au point de vue de la première pointe de pression. Cette première pointe de pression atteint encore



8 kg

FIG. 39. — Enregistrement obtenu à la position (3)



60 kilos, ce qui correspond largement aux prévisions. (Voir figure 37 un tracé obtenu dans ces conditions.) On constate facilement sur ce tracé que l'amortissement des oscillations est plus rapide que lorsque la conduite est rectiligne.

A la position (2) l'enregistrement obtenu présente les mêmes caractéristiques que celles de la position (1), mais les amplitudes de pression sont plus faibles, la première pointe de pression n'atteint plus que 42 kilos. (Voir figure 38 un tracé obtenu dans ces conditions.)

A la position (3), le coup de bélier disparaît presque complètement, on n'enregistre plus qu'une faible surpression d'environ 8 kilos, surpression qui s'établit lentement et qui est généralement modulée suivant une fréquence égale à la fréquence de résonance de la partie de la conduite montée en bras mort et quelquefois suivant une fréquence égale à la fréquence propre de l'ensemble de la canalisation où se fait l'écoulement ; ces deux modulations se superposent alors. (Voir un exemple de ces courbes figure 39.)

A la position (4), c'est-à-dire entre le coude et l'origine de la conduite, le coup de bélier a le même aspect qu'aux positions (1) et (2) mais il est naturellement affaibli, la première pointe de pression n'atteint plus que 30 kilos environ.

A la position (5), c'est-à-dire à l'origine de la conduite, le coup de bélier présente des pointes de pression presque négligeables au début et devient rigoureusement nul dès que la conduite a pris son régime vibratoire sinusoïdal. La figure 40 montre une courbe obtenue dans ces conditions.

Transmission du coup de bélier dans un bras mort. — Nous nous sommes proposé d'enregistrer le coup de bélier transmis à travers une longueur variable de bras mort. Le montage utilisé rappelle celui qui a été employé dans les expériences précédentes ; la conduite principale de 10 mètres de longueur en tube acier 33/42 porte un piquage à angle droit de 1,50 mètre de longueur en tube acier 20/27, ce piquage porte à son extrémité le robinet qui produit le coup de bélier. Dans le prolongement de la conduite principale à partir du coude, on dispose un bras mort de 33/42 de longueur variable. La longueur de ce bras mort a varié entre 0 et 5 mètres. Un petit robinet placé en bout de bras mort permet la purge dans cette région de la conduite. La régularité du temps de fermeture nécessaire pour la comparaison des différents coups de bélier obtenus est assurée au moyen d'un robinet à repoussoir à fermeture automatique régulière.

Essai a). — Sans bras mort. Débit de la conduite 4.080 litres à l'heure. Intensité du coup de bélier 12,30 kg. (Chiffre valable pour toutes les expériences.)

Les tracés obtenus dans ces conditions présentent une surpression initiale assez pointue. Au point de vue des fréquences, on retrouve nettement la fréquence propre de l'élément de conduite de 10 mètres, ainsi que la fréquence propre de l'ensemble de la conduite coudée. Quant à la fréquence propre de l'élément de conduite de 1,50 mètre on ne la distingue pas sur ces tracés. Ceci est dû probablement au fait que lorsque les oscillations deviennent sinusoïdales au bout d'un temps relativement long, l'oscillation sur la fréquence propre de cette partie de la conduite est déjà amortie complètement. Ce point de vue semble se justifier par le fait qu'on retrouve cette fréquence propre lorsque le bras mort augmente de longueur, c'est-à-dire lorsque le coup de bélier transmis est moins violent et atteint par conséquent plus vite le régime oscillatoire sinusoïdal.

Essai b). — Bras mort de 25 cm de longueur. Mêmes conditions de fermeture. Débit dans la conduite 4.050 litres à l'heure. Intensité du coup de bélier 9,85 kg. Même valeur pour les autres expériences.

Les tracés obtenus dans ces conditions présentent une surpression initiale plus arrondie que dans les expériences précédentes. Au point de vue des fréquences, on constate la présence de la fréquence propre d'ensemble de la conduite, de la fréquence propre de l'élément de 1,50 mètre, ainsi que de la fréquence propre de l'élément principal de 10 mètres de longueur.

Essai c). — Bras mort de 50 cm de longueur. Mêmes conditions de fermeture. Débit dans la conduite 4.000 litres à l'heure. Intensité du coup de bélier 6,15 kg. Même valeur pour les autres expériences.

La surpression initiale a, dans ce cas, sensiblement le même aspect que dans les conditions qui précèdent, mais à une échelle réduite. Au point de vue des fréquences, on retrouve encore les mêmes fréquences que celles indiquées plus haut.

Essai d). — Bras mort de 75 cm de longueur. Mêmes conditions de fermeture. Débit de la conduite 4.000 litres à l'heure. Intensité du coup de bélier 5,95 kg. Même valeur pour les autres expériences.

Ces tracés sont peu différents des précédents à tous points de vue.

Essai e). — Bras mort de 1,50 mètres de longueur. Mêmes conditions de fermeture. Débit de la conduite 4.000 litres à l'heure. Intensité du coup de bélier 5,85 kg. Même valeur pour les autres expériences.

Ces tracés sont très peu différents des précédents.

Essai f). — Bras mort de 5 mètres de longueur. Mêmes conditions de fermeture. Débit de la conduite 4.000 litres à l'heure. Intensité du coup de bélier 3,70 kg. Même valeur pour les autres expériences.

Les tracés obtenus dans ces conditions présentent une surpression initiale constituée uniquement par des sinusoides superposées ; on y retrouve la fréquence propre de l'ensemble de la conduite et la fréquence propre du bras mort, soit 5 mètres de longueur.

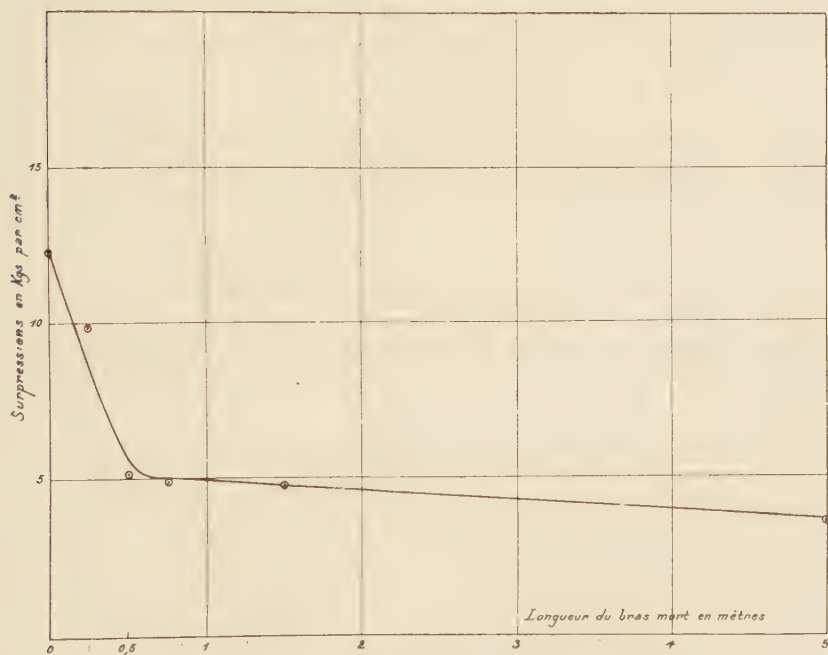


FIG. 41. — Loi d'amortissement du coup de bélier par suite de la transmission à travers un bras mort

On voit d'après ces résultats que lorsque la longueur de la partie de la conduite montée en bras mort augmente en partant de 0, l'intensité du coup de bélier transmis à travers le bras mort décroît d'abord très rapidement, le coup de bélier variant de 50 %, entre 0 et 50 cm, puis beaucoup plus lentement ensuite. Il est remarquable, de plus, qu'au fur et à mesure que la longueur du bras mort augmente, la fréquence propre de l'ensemble de la conduite diminue régulièrement, le bras mort se comporte donc comme un logement d'air à cause de l'élasticité de l'eau et de la conduite. Voir la courbe de l'intensité du coup de bélier transmis en fonction de la longueur du bras mort, figure 41.

B) *Étude des coups de bélier sur des conduites de plomb*

L'allure générale du phénomène reste analogue à ce qu'elle était pour les coups de bélier dans les conduites en acier. On obtient un tracé du même genre avec des pointes de pression qui vont régulièrement en décroissant chaque pointe de pression étant suivie par un palier à pression constante dont l'importance va également régulièrement en décroissant. On retrouve encore au bout d'un certain temps, une oscillation périodique correspondant à une vitesse de propagation définie a .

Paliers. — La durée du palier définie comme dans le cas des conduites en acier n'est plus fonction exponentielle du temps, mais décroît suivant une loi linéaire :

$$T = T_0 - k_1 t$$

k_1 étant un coefficient qui ne dépend que des constantes de la conduite.

Amplitude. — Au point de vue de l'amplitude, des pointes de pression, on trouve aussi une variation suivant une loi linéaire du temps :

$$A = A_0 - k_2 t$$

k_2 étant un coefficient qui ne dépend que des constantes de la conduite. A titre d'exemple, nous donnerons la vérification de ces lois dans un cas particulier. Prenons l'enregistrement d'un coup de bélier sur conduite de plomb de 20 mm de diamètre intérieur, 34 mm de diamètre extérieur, avec une longueur de conduite de 10 mètres, enregistrement pris dans la section de la vanne. Les amplitudes successives mesurées sur le tracé et les temps correspon-

dants, comptés à partir du premier maximum de pression, sont :

Amplitude	Temps correspondants	Amplitude	Temps correspondants
41 kg	0 seconde	8,5 kg	0,447 seconde
29 —	0,140 —	6 —	0,542 —
22,8 —	0,245 —	4 —	0,584 —
16,5 —	0,325 —	2,5 —	0,624 —
12 —	0,390 —	1,5 —	0,664 —

Ce tableau donne la courbe figure 42 qui montre que la loi de variation de l'amplitude est linéaire tant que l'amplitude des oscillations est suffisante pour que subsistent les pointes de pression.

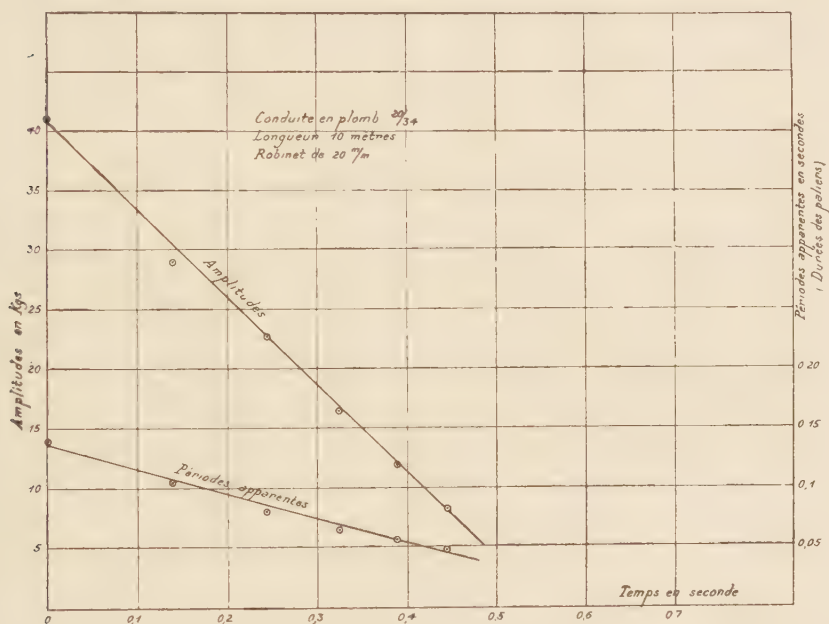


FIG. 42 et 43. — Courbe de variation de l'amplitude et de la durée du palier en fonction du temps. (Coup de béliet sur conduite en plomb)

On a de même pour les durées des paliers et les temps correspondants :

Durée des paliers	Temps correspondants	Durée des paliers	Temps correspondants
0,140 seconde	0 seconde	0,050 seconde	0,447 seconde
0,105 —	0,140 —	0,045 —	0,542 —
0,080 —	0,245 —	0,042 —	0,584 —
0,065 —	0,325 —	0,040 —	0,624 —
0,057 —	0,390 —	0,040 —	0,664 —

Comme on peut le voir, figure 43, la loi de décroissance de la durée des paliers est également linéaire en fonction du temps.

Relation entre les constantes k_1 et k_2

Parallèlement à ce que nous avons fait au sujet des coups de béliet sur les conduites en acier, on peut se demander s'il n'existe pas une relation simple entre ces deux coefficients caractéristiques k_1 et k_2 . Cette relation est fournie par la loi de variation de l'amplitude en fonction de la durée du palier correspondant. On constate dans le cas qui nous intéresse que :

$$\frac{A}{T} = \frac{A_0 - k_2 t}{T_0 - k_1 t} = K = \text{constante}$$

en effet :

$$\frac{41}{0,14} = \frac{29}{0,105} = \frac{22,8}{0,08} = 290$$

d'où on tire nécessairement :

$$k_1 = k_2.$$

Les durées des paliers et les amplitudes des pointes de pression décroissent donc suivant des lois non seulement de la même forme, mais identiques. Le changement de nature du métal de la conduite agit sur la loi d'amortissement des oscillations, mais ne modifie pas profondément la liaison qui existe entre les durées des paliers et les amplitudes des pointes de pression. La loi de variation des amplitudes de pointes de pression et des durées des paliers correspondants, soit en fonction de la longueur de la conduite, soit encore en fonction de la loi de fermeture du robinet, n'est pas sensiblement modifiée en passant d'une conduite d'acier à une conduite de plomb. Par contre, la vitesse de propagation du son dans la conduite, fonction des constantes élastiques du métal dont elle est constituée, doit varier lorsqu'on passe de l'acier au plomb.

Théoriquement, pour une conduite de plomb de 20/34 mm de diamètre, on doit avoir suivant la formule d'Allievi :

$$a = \frac{9.900}{\sqrt{48,3 + k \frac{d}{e}}} = \frac{9.900}{\sqrt{48,3 + 5 \frac{20}{7}}} = 1.255 \text{ m.}$$

Expérimentalement, on trouve pour cette conduite de plomb une vitesse de propagation des ondes :

$$a = 1.000 \text{ m par seconde.}$$

Il y a donc un écart assez notable avec la théorie, qui peut être imputé aux quantités d'air résiduelles à l'intérieur de la conduite.

En fait, notre conduite en plomb n'ayant pas de dispositif spécial était plus difficile à purger que nos conduites en acier.

La variation de vitesse de propagation des perturbations qu'on observe lors du passage d'une conduite en acier à une conduite en plomb entraîne naturellement (à longueur de conduite égale) une variation dans la périodicité du phénomène enregistré.

En résumé, l'influence de la nature du métal de la conduite se fait principalement sentir sur la vitesse de propagation des ondes et sur l'amortissement des pointes de pressions. Ces différences s'expliquent par la variation du coefficient d'élasticité du métal.

Utilisation pratique de ces résultats

La possibilité d'obtenir des enregistrements fidèles de la forme des coups de bélier sur conduite courte dans tous les cas, nous a permis de procéder à un certain nombre d'études pratiques.

En particulier, nous avons pu faire l'étude comparative de l'intensité des coups de bélier donnés par des robinets de types divers.

Nous avons pu également étudier différents types d'antibélier et nous avons pu déterminer les variations de leur efficacité en fonction de la position qu'ils occupent dans l'installation de distribution d'eau.

Enfin nous avons, à la demande de M. Boullé, étudié les variations de pression, provoquées, en aval, par le fonctionnement des compteurs d'eau pour diverses valeurs de la vitesse d'écoulement de l'eau.

Nous avons pu constater ainsi qu'en fonctionnement normal un compteur bien équilibré donne une courbe de surpressions avec des pointes de pression symétriques toutes de faible amplitude, alors qu'un compteur déséquilibré ou présentant des frottements anormaux donne un tracé présentant des pointes de pression inégales ou dissymétriques. L'étude des variations de pression provoquées par le fonctionnement d'un compteur fournit donc des renseignements intéressants, qui permettent de déceler de façon rapide les appareils défectueux.

CHAPITRE VI

INTERPRÉTATION THÉORIQUE DES PHÉNOMÈNES OBSERVÉS

Utilisation de la méthode graphique de M. Bergeron et Schnyder (40)

Allievi, dans son mémoire publié en 1904 dans la *Revue de Mécanique* ne donne aucune indication sur les possibilités d'application de sa théorie classique du coup de bélier dans le cas où la surpression dépasse la pression de régime de la conduite. Il indique simplement que, dans ces conditions, la pression devient négative, c'est-à-dire que : après la fermeture la colonne liquide est repoussée par la contraction élastique du tuyau avec une telle violence qu'il s'y produit des discontinuités et des vides près de la vanne, ce qui trouble notablement les lois du phénomène. Il précise plus loin que l'hypothèse ainsi formulée est, dans beaucoup de cas, justifiée par l'expérience. Ce phénomène de charge oscillante après la fermeture de la vanne et de flux et de reflux de l'eau entre le tuyau et le réservoir a été maintes fois observé et les données expérimentales satisfont à la loi de l'oscillation rythmique à période de $4 L/a$.

M. Bergeron a récemment développé le point de vue classique d'Allievi de l'existence d'ondes se propageant à vitesse constante et on a déduit une méthode graphique remarquable, applicable sans aucun calcul complexe, dans tous les cas, à la prévision des coups de bélier dans les conduites. L'application de cette méthode reste toujours relativement simple, même dans le cas de conduites à caractéristiques multiples.

Moyennant quelques hypothèses simples, on réussit facilement à l'appliquer à la prévision de phénomènes qui se produisent lorsque la surpression dépasse la pression de régime de la conduite. Nous sommes conduits à décrire cette méthode graphique, qui, jusqu'ici, n'a pas été l'objet d'une publication complète (33).

Principe de la méthode graphique. — Cette méthode, dont on remarquera la grande simplicité, utilise la traduction graphique des

équations de propagation classiques d'Allievi. Considérons, pour simplifier l'exposé, une conduite linéaire, à caractéristique unique, alimentée directement par un réservoir et pourvue à son autre extrémité d'une vanne ou d'un obturateur quelconque A (fig. 44). Supposons un régime permanent d'écoulement préalablement établi, si H_0 représente la pression constante d'alimentation au réservoir, exprimée en mètres d'eau et si h_0 représente la pression de régime au point A avant la manœuvre de fermeture de la vanne, les équations

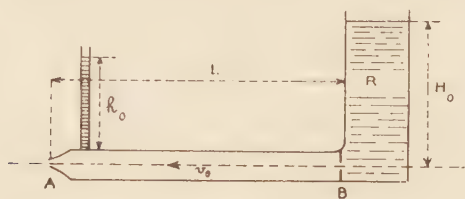


FIG. 44. — Méthode graphique
Représentation schématique du circuit hydraulique considérée

tions d'Allievi donnent pour la pression en A au temps i , au cours de la manœuvre de la vanne :

$$h_i = h_0 + F_i + f_i \quad (6)$$

où F_i représente l'amplitude de l'onde directe provoquée par la fermeture ou l'ouverture de la vanne, onde qui se propage à la vitesse a , et f_i désigne l'amplitude de l'onde inverse se propageant en sens inverse avec la même vitesse.

La deuxième relation d'Allievi, équation caractéristique d'une conduite déterminée, donne la relation entre la vitesse v_i de l'eau dans la conduite et l'amplitude des ondes directes et inverses :

$$v_i = v_0 - \frac{g}{a} (F_i - f_i) \quad (7)$$

où g représente l'accélération de la pesanteur.

Mais le principe de la conservation de l'énergie fournit une relation supplémentaire entre la pression constante H_0 au réservoir, la pression instantanée h_i en un point de la conduite et la vitesse d'écoulement v_i qui est en première approximation :

$$mgH_0 - mgh_i = \frac{1}{2} mv_i^2$$

d'où :

$$H_0 - h_i = \frac{v_i^2}{2g} \quad (8)$$

en négligeant les pertes de charge dues à la viscosité de l'eau et au frottement sur la paroi de la conduite. En général il faut tenir compte de la perte de charge J et l'équation (8) devient, en écrivant que la perte de charge est proportionnelle au carré de la vitesse d'écoulement :

$$H_0 = h_i + \frac{v_i^2}{2g} + \xi \frac{v_i^2}{2g} = h_i + \frac{v_i^2}{2g} (\xi + 1) \quad (9)$$

le coefficient de proportionnalité ξ de la perte de charge au carré de la vitesse d'écoulement peut être calculé à partir des données des tables de Darcy ou de Maurice Lévy, mais il nous a semblé préférable de la déduire directement des mesures de H_0 , de la pression du régime d'écoulement permanent dans la section A et du débit en régime permanent. En éliminant F_i entre les relations (6) et (7), on obtient :

$$h_i - h_0 = \frac{a}{g} (v_0 - v_i) + 2f_i. \quad (10)$$

Cette relation traduit le fait qu'en l'absence d'onde inverse, la vitesse v_i au point considéré est liée à la pression par une loi linéaire ; la droite représentative $M_0 A$ a pour pente a/g .

D'une façon plus générale, si la fermeture du robinet est complète en un temps inférieur à $2L/a$, la surpression dans la section A sera donnée par la relation :

$$h_i - H_0 = \frac{av_0}{g} \pm 2f_i$$

le point représentatif de cette surpression étant, sur la figure 45, B_1 ou B_2 suivant que f_i est négatif ou positif.

Mais, par ailleurs, si nous désignons par s la section utile de l'orifice de la vanne et par S la section interne de la conduite, nous aurons une autre relation entre h et v imposée par la vanne. Si la conduite débouche à l'air libre, on pourra écrire :

$$mgh_0 = \frac{1}{2} mV_0^2 \text{ en régime permanent}$$

en désignant V_0 la vitesse d'écoulement à l'intérieur de la vanne.

Cette relation n'est plus rigoureuse en régime variable, mais en pratique on s'écarte assez peu de la réalité en l'appliquant en régime

variable, dans le cas particulier étudié, par suite de la faible pression d'alimentation de nos conduites (3,5 kg par cm²).

L'égalité des débits impose entre V_0 et v_0 la relation :

$$v_0 S = V_0 s$$

si S désigne la section de la conduite et s la section de l'orifice du robinet. D'où :

$$V_0 = \frac{v_0 S}{s}$$

donc :

$$h_0 = \frac{V_0^2}{2g} = \frac{v_0^2 S^2}{2g \cdot s^2} = \frac{v_0^2}{2g \frac{s^2}{S^2}}$$

en posant

$$\psi = \frac{s}{S}$$

il vient :

$$h_0 = \frac{v_0^2}{2g\psi^2}. \quad (12)$$

Soit $O\psi_0$ la parabole représentative des variations correspondantes de h en fonction de v . Le point correspondant au régime permanent sera donné par la solution commune qui satisfait aux deux relations (9) et (12), c'est-à-dire qu'il sera représenté par le point d'intersection des deux paraboles qui les représentent.

La droite $M_0 A$ qui traduit la relation (10), en l'absence d'onde inverse, devra être translatée vers le bas d'une longueur $2f_i$ en $B_1 B'_1$ si une onde inverse négative f_i intervient ; elle devra au contraire remonter de $2f_i$ en $B_2 B'_2$ si l'onde inverse est positive.

Si l'on veut tenir compte des pertes de charge qui sont rarement négligeables, il faudra diminuer les ordonnées de ces droites de la quantité :

$$\frac{v_i}{2g} (\xi + 1)$$

on obtient ainsi les courbes caractéristiques réelles de la conduite, qui ne dépendent en aucune manière de la loi de fermeture de la vanne (ou de la nature de l'organe perturbateur), voir figure 45.

Si, au temps i considéré, la section du robinet a été diminuée, la parabole de pression imposée par la vanne dans la section A de la conduite sera de ce fait modifiée, désignons par $O\psi_i$ cette nouvelle courbe ; le point représentatif de la pression dans la conduite à

cet instant dans la section considérée se trouvera à l'intersection de la courbe caractéristique de la conduite avec cette dernière parabole $O\psi_i$.

Détermination de l'onde inverse f_i . — Pour effectuer correctement cette détermination, il faut tenir compte des caractéristiques de

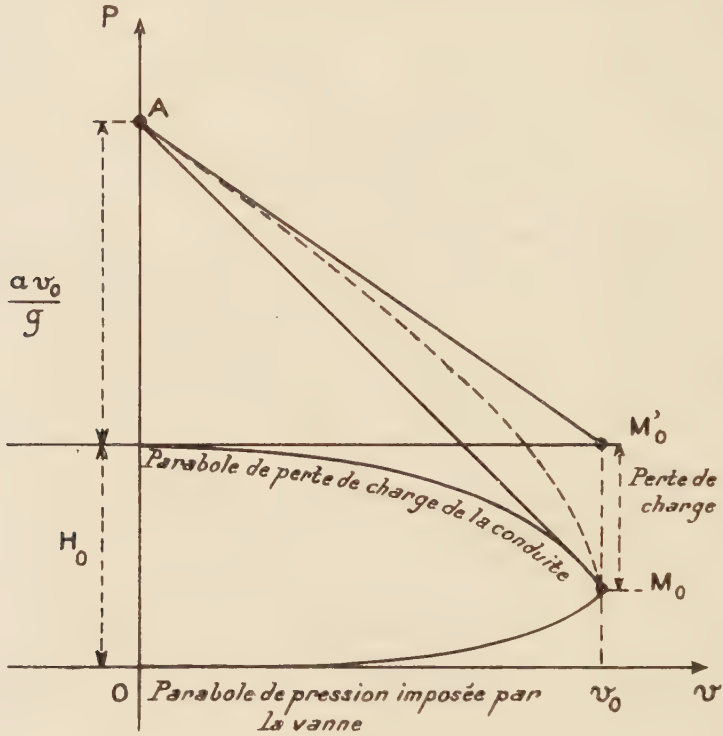


FIG. 45. — Courbes caractéristiques de la conduite

M_0 : point de fonctionnement réel avant fermeture ;

M'_0 : point de fonctionnement en négligeant les pertes de charges.

l'installation. S'il s'agit d'une conduite à caractéristique unique alimentée par un réservoir à pression constante, la méthode est simple. Pour ne pas compliquer les choses, nous supposons que l'installation qui a servi pour nos expériences entre dans ce cadre.

Soit L la longueur de la conduite entre la vanne A et le réservoir R ; supposons toujours la conduite en régime permanent d'écoulement au temps O , la pression qui règne au point A à ce moment, est :

$$h_0 = H_0 - (\xi + 1) \frac{v_0^2}{2g}.$$

Si la fermeture de la vanne est brusque, c'est-à-dire si elle s'effectue en un temps inférieur à

$$2\tau = \frac{2L}{a}$$

l'onde directe d'amplitude av_0/g part du point A vers B avec la vitesse a , elle atteint le point B, c'est-à-dire le réservoir à pression constante au temps τ . Or, en B la constance du niveau d'eau impose la constance de H_0 , de sorte que l'onde directe F qui arrive en ce point et l'onde inverse f qui y prend naissance, doivent être telles que :

$$F = f = 0 \quad (13)$$

d'où :

$$f = -F$$

L'onde directe F se réfléchit donc en B en changeant de signe.

Examinons maintenant ce qui se passe au point A : jusqu'au temps 2τ l'onde inverse n'est pas encore parvenue en A, la pression restera donc jusqu'à ce moment constante et égale à :

$$H_0 + F$$

si la fermeture du robinet est totale, elle restera égale à :

$$H_0 + \frac{av_0}{g}.$$

A partir du temps 2τ l'onde inverse arrive en A, et la pression passe brusquement à la valeur :

$$H_0 + \frac{av_0}{g} + 2f = H_0 + \frac{av_0}{g} - \frac{2av_0}{g}$$

si on néglige l'amortissement de l'onde au cours de la propagation la pression sera entre le temps 2τ et le temps 4τ égale à :

$$h = H_0 - \frac{av_0}{g}.$$

Ici, deux cas se présentent : ou H_0 est supérieur à av_0/g et l'on se trouve dans le cas prévu par la théorie classique d'Allievi, ou bien, comme c'est généralement le cas dans nos expériences, la surpression est de beaucoup supérieure à H_0 . Dans ce dernier cas, la théorie d'Allievi ne peut plus être directement appliquée, car les lois du phénomène se trouvent considérablement modifiées. En effet, sous l'influence de l'onde inverse, la pression tend à devenir négative

dans la section du robinet, mais comme l'eau de la conduite contient de l'air à l'état dissous, et que, de plus, on ne peut pratiquement purger d'air la conduite d'une façon parfaite, cette pression négative ne peut, en fait, s'établir. Comme nous l'avons constaté expérimentalement, cette brusque dépression provoque un recul en masse de la colonne liquide, la pression dans la section du robinet conservant une valeur constante et égale à — 1 kilo, pendant tout le mouvement de la colonne liquide.

Dans ce cas, les phénomènes ne peuvent plus être prévus simplement par le calcul et il est plus simple d'avoir recours à la méthode graphique que nous allons exposer ; avant de commencer cet exposé, il est nécessaire de bien préciser les hypothèses que l'on place à la base. On suppose :

1° Que les ondes de pression continuent à se propager avec la même vitesse qu'avant le départ, pendant le mouvement d'ensemble de la colonne liquide ; 2° que l'amortissement de l'onde au cours de sa propagation est négligeable ; 3° que la fermeture de la vanne est instantanée ou, tout au moins que la partie efficace de cette fermeture est instantanée ; 4° que la réflexion sur les extrémités de la conduite se fait sans perte d'amplitude ; 5° pour simplifier les constructions graphiques, que la perte de charge n'est pas répartie le long de la conduite, mais concentrée par exemple au point B.

Il est évident que ces hypothèses ne correspondent pas exactement à la réalité et que l'on néglige des phénomènes qui ne sont certainement pas rigoureusement négligeables. Malgré les approximations ainsi faites, nous verrons par la suite que cette méthode graphique permet de prévoir au moins dans les grandes lignes les lois du phénomène que nous avons enregistrées.

Reprenons maintenant l'étude graphique des phénomènes au point où nous l'avons laissée, c'est-à-dire au moment où l'onde inverse de grande amplitude arrive au point A. Une dépression considérable tend à se produire, mais, comme nous l'avons vu, cette dépression se trouve physiquement limitée lorsque la pression interne de la conduite atteint le vide, alors la partie la plus importante de la dépression due à l'onde inverse a pour effet de provoquer un recul en masse de la colonne liquide. Cherchons à déterminer la vitesse initiale du mouvement de recul. Le plus simple est de procéder à une construction graphique. Considérons la construction graphique précédemment faite : la fermeture brusque nous a amenés au point A de la figure 45, en suivant la courbe $M_0 A$ caractéristique

de la conduite, avec une surpression égale à av_0/g , le point représentatif reste au point A tant que l'onde inverse f n'intervient pas, c'est-à-dire pendant un temps 2τ , puis au temps 2τ , l'onde inverse atteint le point A et le point représentatif se déplace sur une courbe parallèle à AM_0 (pratiquement assimilable à une droite) distante de $2f = -2av_0/g$. Mais, comme la dépression se trouve limitée au vide, le point de fonctionnement se trouvera nécessairement au point d'intersection entre cette parallèle et la droite horizontale correspondant à une ordonnée $h = -1$ kilo. La connaissance de ce point de fonctionnement permet de déterminer directement la vitesse initiale du recul de la colonne liquide (vitesse évidemment négative) cette vitesse étant inférieure à la vitesse d'écoulement permanent qui régnait avant la fermeture de la vanne. La pression restera nulle en A tant que la colonne liquide ne sera pas revenue frapper l'extrémité A de la conduite ; cette colonne subissant en B l'action d'une force retardatrice constante correspondant à l'action de la pression constante H_0 sera animée d'un mouvement à accélération constante si on néglige les pertes de charge ou plus exactement à accélération variable si on tient compte des pertes de charge qui ne peuvent généralement pas être négligées.

La méthode graphique permet, en suivant les ondes qui continuent à se propager au sein même de la colonne liquide en mouvement, de prévoir la pression atteinte au moment du retour en A de la masse d'eau en mouvement. Pour pouvoir suivre les ondes qui se propagent au sein de la colonne liquide, il faut considérer qu'après l'arrivée de l'onde inverse en A, celle-ci se réfléchit en changeant de signe, c'est-à-dire que l'onde inverse redevient de ce fait une onde directe. Pour obtenir la courbe caractéristique de la conduite pour une onde directe, il faudra éliminer f_i et non plus F_i entre les relations (6) et (7) et on obtient alors :

$$h_i - h_0 = -\frac{a}{g}(v_0 - v_i) + 2F_i \quad (14)$$

la courbe représentative est donc symétrique de la première avec une pente de signe contraire.

Le point de départ de cette courbe (assimilée à une droite comme précédemment) sera nécessairement l'état de pression et de vitesse de l'eau en A, déterminée par l'arrivée de l'onde incidente d'où est née cette onde réfléchie, point déjà connu d'ordonnée $h = -1$ kg. Le point représentatif de l'état de la conduite en B au moment

où cette nouvelle onde directe parvient au réservoir, c'est-à-dire au temps 3τ sera à l'intersection de cette dernière courbe avec la courbe de pression complexe résultant, d'une part, de la présence du réservoir en B qui tend à imposer une pression constante H_0 et, d'autre part, de la perte de charge de la conduite supposé concentrée en B ; l'ensemble de ces deux conditions imposant des points de fonctionnement situés sur une parabole (parabole de perte de charge) dont l'origine a pour abscisse 0 et pour ordonnée H_0 .

La pression correspondant au point d'intersection sera H_0 plus la perte de charge imposée par la conduite. Perte de charge définie elle-même par la vitesse correspondante de la colonne liquide, vitesse déterminée par l'abscisse même du point d'intersection. Pour préparer comme il convient la construction graphique, il est commode de tracer à l'avance la partie utile de la parabole de pertes de charge. L'onde se réfléchit en B avec changement de signe et se transforme à nouveau en onde inverse jusqu'à ce qu'elle atteigne A et ainsi de suite, la construction graphique découle directement de ces considérations, comme nous l'avons vu.

Il faut déterminer en plus l'instant exact où la colonne liquide revient frapper l'extrémité de la conduite correspondant au point A. Ce sont des considérations de débit qui permettent le plus simplement de déterminer cet instant où la colonne liquide, venant frapper brutalement le fond de la conduite, provoquera une surpression brusque, qui engendrera une nouvelle onde de pression. Comme l'instant du départ de cette nouvelle onde ne coïncidera généralement pas avec un multiple pair du temps τ , il sera nécessaire de faire une nouvelle construction graphique en tenant compte de la propagation de deux ondes indépendantes animées d'une même vitesse de propagation a .

Pour la détermination de l'instant où la colonne liquide revient en A, nous simplifierons encore les choses en supposant que la vitesse de la colonne liquide reste constante pendant un aller et retour de l'onde, ce qui n'est pas rigoureusement exact, mais l'erreur commise se compense à peu près par suite du débit dans les deux sens, malgré la dissymétrie introduite dans le mouvement par l'existence des pertes de charge. Si nous portons en abscisse les temps exprimés en $\tau = L/a$ et en ordonnées les vitesses successives de la colonne liquide, supposées constantes dans un intervalle de $2L/a$ nous obtenons une courbe en forme de marche d'escalier. Il

est évident que la surface comprise entre l'axe des temps et la courbe, représente le débit ; la partie qui correspond aux vitesses négatives représente le volume correspondant au recul de la colonne liquide, tandis que l'autre partie représente le volume balayé au retour de cette colonne. Le choc aura nécessairement lieu au moment exact où ces deux surfaces seront égales.

Ayant ainsi déterminé l'époque où la colonne liquide vient frapper l'extrémité A de la conduite, on en déduit immédiatement par le graphique la vitesse de la colonne liquide à ce moment ; en supposant que ce choc peut être assimilé à la fermeture brusque d'un robinet, on peut déterminer graphiquement la surpression qu'il met en jeu. Cette nouvelle surpression donnera naissance à une nouvelle onde de même nature que la première. Comme en général l'époque de son apparition ne coïncidera pas avec un multiple de 2τ , on aura à considérer deux ondes distinctes qui se propageront avec la même vitesse. On étudiera séparément sur un nouveau graphique la propagation de ces deux ondes. En général, la surpression qui a donné naissance à la deuxième onde entraîne, au retour de l'onde inverse qu'elle produit, un nouveau recul en masse de la colonne liquide. Au moment où la colonne liquide viendra frapper à nouveau l'extrémité A de la conduite, elle provoquera une troisième surpression, qui engendrera une troisième onde et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'amortissement des oscillations soit tel qu'il n'y ait plus de recul en masse de la colonne liquide. A partir de cette époque, le phénomène redevient continu et rentre dans le cadre de la théorie classique.

Comme on peut le remarquer sur les graphiques donnés plus loin, comme exemple d'application de la méthode que nous venons d'exposer, l'intervalle de temps qui sépare le départ des deux ondes engendrées par deux pointes de pression successives, étant sans liaison directe avec le temps τ de propagation des ondes le long de la conduite, la forme des pointes de pression qui suivent la première sera généralement crénelée par suite de la superposition de plusieurs ondes successives. La forme de ces pointes sera naturellement variable d'un exemple à l'autre.

Avant de terminer cet exposé, il est nécessaire d'indiquer qu'en dehors des hypothèses qu'on est amené à faire pour simplifier la construction et que j'ai formulées explicitement, on en fait implicitement une autre qui consiste à admettre qu'aucune onde n'est transmise par le métal de la conduite, ce qui est contraire à la réalité, car

de telles ondes interviennent en fait. On voit donc qu'une méthode graphique ainsi simplifiée ne permettra pas de prévoir les phénomènes dans leurs moindres détails ; malgré cela, comme on peut le voir dans l'exemple d'application au cas d'un de nos enregistrements, les résultats obtenus à l'aide de cette méthode graphique simple doivent être considérés comme très satisfaisants et permettent de prévoir et même de préciser la nature des phénomènes hydrodynamiques enregistrés.

Exemple d'application de cette méthode

Prévision d'un coup de bélier sur conduite acier 33/42.

Longueur de la conduite : 30 mètres.

Vitesse d'écoulement en régime : 5,20 mètres par seconde.

Pression au réservoir : $H_0 = 3,6$ kg par centimètre carré.

Pression en A en régime : $h_0 = 0,25$ kg par centimètre carré.

Robinet 1/4 de tour de 33 mm.

La vitesse de propagation des ondes calculée par la formule d'Allievi, sera :

$$a = 1.375 \text{ mètres par seconde.}$$

La surpression maximum obtenue pour une fermeture brusque du robinet sera donc :

$$\frac{av_0}{g} = \frac{1.375 \cdot 5,20}{9,81} = 73,2 \text{ kg}$$

la première pointe de pression atteindra donc théoriquement :

$$73,2 + 3,6 = 76,8 \text{ kg.}$$

La valeur expérimentale lue sur notre enregistrement photographique est 80 kilos, l'accord entre la théorie et nos chiffres n'est donc pas trop mauvais.

Avant de commencer la construction graphique, il faut déterminer la parabole de pertes de charge de la conduite, le plus simple est, comme nous l'avons dit, de calculer le coefficient ξ à partir des mesures faites en régime permanent d'écoulement, et de calculer ensuite les pertes de charge obtenues pour différentes vitesses, ce qui permet de tracer ensuite la parabole par points. On a donc dans notre exemple :

$$h_0 = H_0 - (\xi + 1) \frac{v_0^2}{2g} = 0,250 \text{ kg}$$

avec : $H_0 = 3,6$ kg et $v_0 = 5,20$ mètres par seconde. On en tire :

$$\xi + 1 = 2,44 \qquad \xi = 1,44$$

La parabole devra donc passer par les points suivants :

$v = 0$	$h_0 = 3,6$ kg
$v = 1$ mètre	$h = 3,476$
$v = 2$	$h = 3,104$
$v = 2,5$	$h = 2,825$
$v = 3$	$h = 2,480$
$v = 4$	$h = 1,610$
$v = 5,2$	$h = 0,250$

du côté des vitesses négatives, la perte de charge est ajoutée à la pression du réservoir au lieu d'être retranchée, et on obtient :

$v = 0$	$h_0 = 3,6$ kg
$v = -1$ mètre	$h = 3,724$
$v = -2$	$h = 4,096$
$v = -2,50$	$h = 4,375$
$v = -3$	$h = 4,720$
$v = -4$	$h = 5,590$
$v = -5,20$	$h = 6,950$

La parabole de charge imposée par le robinet peut être déduite des mêmes déterminations. On a en effet :

$$h = \frac{v^2}{2g\psi^2}.$$

Théoriquement $\psi = 1$ donc $\psi^2 = 1$, mais en pratique, la section utile d'un robinet est toujours plus faible que la section de la conduite sur laquelle il s'adapte, donc $\psi < 1$, dans notre cas, on a :

$$\psi^2 = \frac{v_0^2}{2gh_0} = 0,55$$

d'où :

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,741$$

on en déduit le rapport du diamètre utile du robinet au diamètre interne de la conduite :

$$d/D = \sqrt{0,741} = 0,86$$

en calculant pour les vitesses d'écoulement suivantes les pressions

Après avoir tracé ces branches de parabole, on trace la droite $M_0 A$ (indiquée sur le graphique par le temps de validité $0_A 2_A$ temps évalué en τ). On porte ensuite sur le tracé la droite caractéristique valable pour l'onde inverse, symétrique de $M_0 A$ par rapport à l'axe des pressions, soit la droite $2_A 1_B$, puis de ce dernier point on suit de nouveau une droite caractéristique de l'onde directe, compte tenu de l'arrivée de l'onde inverse, droite décalée vers le bas de $2f$ c'est-à-dire de 146,40 kg. Ce qui détermine le point 2_A valable jusqu'au temps 4_A , par intersection de cette droite avec l'horizontale d'ordonnée $h = -1$ kg. Puis l'onde redevient une onde inverse et

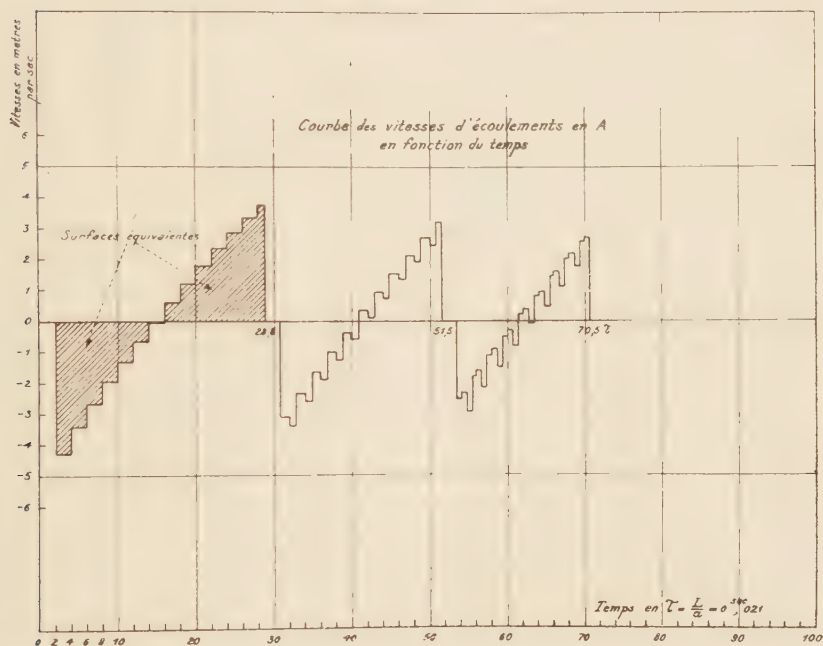


FIG. 47. — Application de la méthode graphique à un coup de béliet sur conduite acier 33/42. Courbe des vitesses d'écoulement

la droite caractéristique possède à nouveau une pente inverse ; elle part du point précédemment déterminé et vient couper la parabole de pertes de charge au point 3_B qui détermine l'état de la conduite au temps 3τ dans la section B. La construction graphique se poursuit ainsi jusqu'au moment où la colonne liquide vient frapper le fond de la conduite, instant qui est fourni par le graphique des débits, alors apparaît une surpression brusque d'onde directe

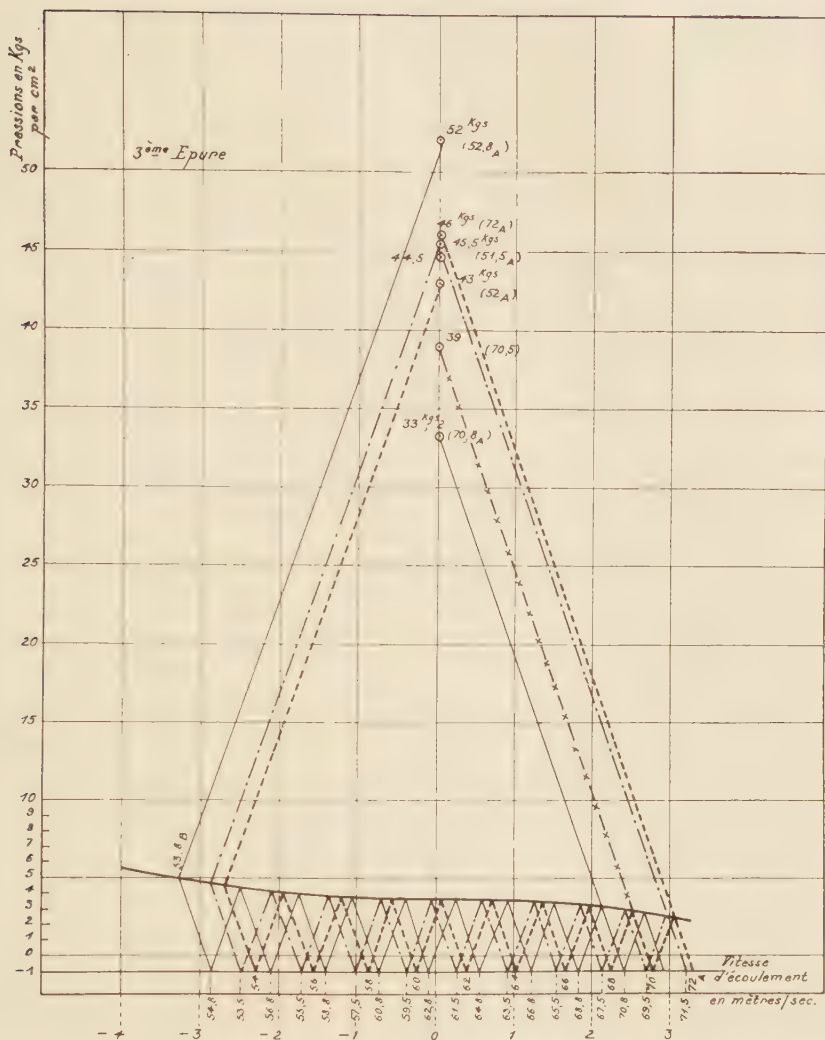


FIG. 49. — Application de la méthode graphique à un coup de béliet sur conduite acier 33/42. 3^e Epure

52 kilos, ces chiffres doivent être augmentés de la surpression qui se produit au même instant dans la grosse conduite de 200 mm qui alimentait notre conduite de 33 mm ; pour la première pointe cette pression supplémentaire est comme nous l'avons vu, 1,73 kg par centimètre carré, pour la deuxième pointe elle est de 1,22 kg et pour la troisième de 1,08 kg. Les pressions réellement atteintes

doivent donc être théoriquement 78,5, 60,2 et 53 kilos, il n'y a donc pas de gros écarts avec les valeurs relevées sur la courbe expérimentale donnée figure 50 *bis*, qui sont 80, 61 et 44 kilos.

Pour les durées des paliers qui séparent les pointes successives les divergences sont beaucoup plus importantes ; on relève sur la courbe expérimentale les valeurs successives suivantes : 0,41, 0,30 et

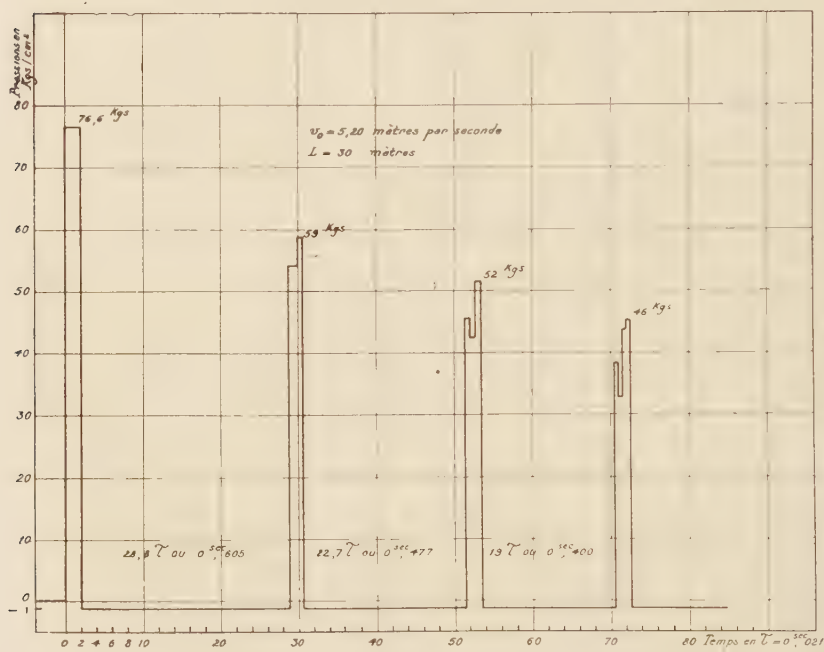


FIG. 50. — Prévion théorique du coup de bélier dans une conduite acier 33/42 à l'aide de la méthode graphique

0,25 secondes, alors que la construction graphique donne : 28,8 τ , 22,7 τ , 19 τ , ce qui correspond à 0,60, 0,47 et 0,40 secondes. Ces divergences très sérieuses, montrent que les hypothèses destinées à simplifier les constructions graphiques ne cadrent certainement pas avec la réalité, mais elles n'infirment pas nécessairement la validité de cette méthode.

Ces divergences peuvent s'expliquer au moins en partie, si on se rappelle que la conduite que nous avons utilisée n'aboutissait pas, comme on le suppose dans la théorie, à un réservoir à pression constante, mais à une conduite de plus gros diamètre (200 mm) de plusieurs centaines de mètres de long.

Au moment du recul de la colonne liquide, on peut prévoir que la pression augmentera dans cette grosse conduite au lieu de rester à la valeur constante de la pression au réservoir; cette augmentation de la pression ayant pour effet de diminuer la durée des paliers. Cette augmentation de pression peut d'ailleurs être calculée par la formule d'Allievi, connaissant les constantes de cette conduite, si comme c'était le cas la conduite est de très grande longueur, la pression restera pratiquement constante pendant toute la durée du recul avec la valeur :

$$h = H - \frac{av_0}{g} = 3,5 \text{ kg} + \\ + \frac{1.200 \times 0,142}{9,81} = 5,3 \text{ kg environ.}$$

Prévision cinématique du mouvement de la colonne liquide

La validité des résultats de la méthode graphique pour l'interprétation de la première phase du coup de bélier, c'est-à-dire avant le départ de la colonne liquide, ne peut être discutée, puisque la théorie classique s'applique sans réserve. Nous avons au contraire jugé utile de justifier les chiffres obtenus graphiquement pendant la deuxième phase du coup de bélier par des prévisions cinématiques de la loi du mouvement de la colonne liquide après son départ provoqué par le retour de l'onde inverse dans la section A.

Première approximation. — Dans une première approximation assez

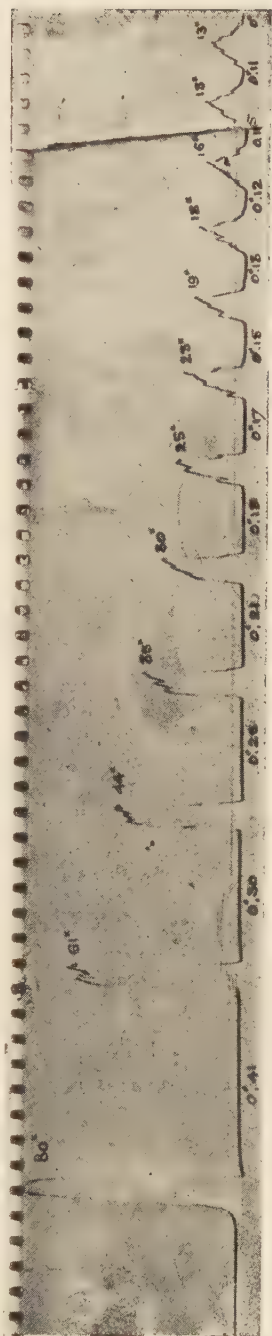


FIG. 50 bis. — Courbe correspondante, obtenue expérimentalement

grossière, on peut étudier le mouvement de la colonne liquide, en négligeant totalement les forces de frottement, donc en négligeant les pertes de charge.

Le problème est alors très simple, la colonne liquide lancée avec une vitesse initiale v_0 est ensuite animée d'un mouvement uniformément retardé dans une première phase, par suite de l'action de la pression constante au réservoir. Le mouvement devient ensuite uniformément accéléré après que la vitesse s'est annulée.

Soit m la masse de l'eau de la colonne en mouvement, nous aurons si S désigne la section de la conduite et H_0 la pression au réservoir en centimètre d'eau :

$$f = H_0 S = m\gamma,$$

d'où

$$\gamma = \frac{H_0 S}{m}.$$

La vitesse, à chaque instant, sera donnée par :

$$v_i = v_0 - \gamma t$$

et l'espace parcouru au temps t sera :

$$e = v_0 t - \frac{1}{2} \gamma t^2$$

l'amplitude maximum du recul ayant lieu pour $v = 0$ sera :

$$e_{\max} = v_0^2 / 2 \gamma \text{ à l'instant } t = v_0 / \gamma$$

la vitesse au moment du retour en A de la colonne liquide sera égale comme on le sait à $-v_0$ et l'époque de ce retour est :

$$t = 2 v_0 / \gamma$$

Application numérique. — Si nous appliquons ces résultats au cas particulier étudié précédemment, nous obtenons, puisque

$$m = \pi d^2 / 4 \cdot 1.3.000 = 2,57.10^4 \text{ grammes masse,}$$

et :

$$f = H_0 \cdot S = 2,94.10^7 \text{ dynes,}$$

donc :

$$\gamma = \frac{H_0 S}{m} = \frac{2,94.10^7}{2,57.10^4} = 1,14.10^3 \text{ cm/sec. sec.}$$

Le temps au bout duquel a lieu le retour de la colonne liquide, sera :

$$t = \frac{2 v_0}{\gamma} = \frac{860}{1,14.10^3} = 0,755 \text{ sec.}$$

car $v_0 = 4,30$ mètres par seconde.

L'élongation maximum correspondante sera :

$$e_{\max} = \frac{v_0}{2\gamma} = \frac{430}{2 \cdot 1,14 \cdot 10^3} = 82,5 \text{ cm.}$$

Expérimentalement on trouve : $t = 0,41$ seconde, l'écart est très considérable, mais, avec la faible approximation qu'on peut espérer d'une prévision aussi grossière, on retrouve mal l'ordre de grandeur :

Deuxième approximation. — On tient compte des pertes de charge, comme on le sait, les pertes de charge sont proportionnelles au carré de la vitesse de la colonne d'eau et à la longueur de la conduite. En désignant par ξ le coefficient de proportionnalité à la vitesse et à la longueur, caractéristique de la conduite, on a, pour la force de frottement :

$$f = \xi \frac{v_i}{2g} \cdot L = m\gamma'$$

γ' désignant l'accélération due à cette force, sera variable avec la vitesse, donc variera constamment au cours du mouvement de la colonne liquide. Cette accélération change même de signe avec le sens du mouvement. Pour simplifier les calculs, nous ne tiendrons d'abord pas compte de ces variations et nous prendrons une accélération constante et égale à la valeur moyenne de cette accélération, au cours de chaque partie du mouvement, le mouvement étant scindé en deux parties :

Une première partie s'étendant à la période où la vitesse passe de v_0 à $v = 0$. On aura alors :

$$v = v_0 - (\gamma + \gamma')t$$

d'où l'espace parcouru :

$$e = v_0 t - 1/2 (\gamma + \gamma') t^2$$

La deuxième partie s'étendant de $v = 0$ au retour de la colonne liquide ; on a pendant cette période :

$$v = (\gamma - \gamma') t$$

L'espace parcouru correspondant sera :

$$e = 1/2 (\gamma - \gamma') t^2$$

Le temps qui sépare le départ et le retour de la colonne liquide doit, de ce fait, être calculé en deux fractions t_1 et t_2 .

t_1 espace de temps qui sépare le départ du moment où $v = 0$ sera donné par :

$$v = v_0 - (\gamma + \gamma') t_1 = 0$$

donc :

$$t_1 = \frac{v_0}{\gamma + \gamma'}.$$

L'amplitude maximum du recul sera par suite :

$$e_{\max} = v_0 t_1 - \frac{1}{2} (\gamma + \gamma') t_1^2 = \frac{1}{2} \times \frac{v_0^2}{\gamma + \gamma'}.$$

Le retour de la colonne liquide dans la section A se produira lorsque l'élongation du second mouvement sera égale à $e_{\max}$ donc :

$$t_2 = \sqrt{\frac{v_0^2}{(\gamma + \gamma') (\gamma - \gamma')}}.$$

Le temps total correspondant à l'ensemble du mouvement sera donc :

$$T = t_1 + t_2 = v_0 \left(\frac{\sqrt{\gamma + \gamma'} + \sqrt{\gamma - \gamma'}}{(\gamma + \gamma') \sqrt{\gamma - \gamma'}} \right). \quad (15)$$

La vitesse de la colonne liquide au moment du retour en A sera calculé en remplaçant t par t_2 dans l'expression de v :

$$v_{\text{retour}} = \frac{v_0 \sqrt{\gamma - \gamma'}}{\sqrt{\gamma + \gamma'}} \quad (16)$$

cette vitesse est inférieure à v_0 comme on pouvait le prévoir.

Application numérique. — On prendra pour γ' l'accélération des forces de frottement correspondant à la vitesse moyenne, on a ainsi :

$$\gamma'_{\text{moyen}} = 3,86.10^2$$

Le temps total correspondant sera : $T = 0,687$ seconde.

On voit qu'on se rapproche déjà un peu de la valeur trouvée expérimentalement bien que l'hypothèse faite ne rende pas exactement compte de la réalité. L'élongation maximum atteinte sera :

$$e_{\max} = 57,5 \text{ cm}$$

Enfin, calculons la vitesse de la colonne liquide à l'instant du retour :

$$v_{\text{retour}} = 3.025 \text{ mètres par seconde}$$

On peut constater que les chiffres ainsi trouvés ne s'écartent qu'assez peu des déterminations effectuées par la méthode graphique ; en effet, nous trouvons ici :

$$T = 0,687 \text{ seconde}$$

alors que la méthode graphique donne :

$$T = 0,645 \text{ seconde}$$

de même, nous avons obtenu :

$$v_{\text{retour}} = 3,025 \text{ m par seconde,}$$

alors que la méthode graphique donne

$$v_{\text{retour}} = 3,70 \text{ m par seconde.}$$

Théorie complète du mouvement de la colonne liquide. Si l'on veut étudier de façon plus précise le mouvement de la colonne liquide, on ne doit plus négliger les variations de γ' , on écrira toujours que γ' est proportionnel au carré de la vitesse.

$$\gamma' = Kv^2$$

K étant le coefficient de perte de charge expérimentalement déterminé. Mais la définition même de l'accélération donne :

$$\frac{dv}{dt} = -(\gamma + Kv^2)$$

pour la première partie du mouvement,
d'où :

$$dt = -\frac{dv}{\gamma + Kv^2} = -\frac{1}{\gamma} \frac{dv}{1 + \frac{K}{\gamma} v^2}$$

en divisant et multipliant par $\sqrt{K/\gamma}$ on obtient :

$$dt = -\frac{1}{\sqrt{K\gamma}} \frac{d\sqrt{\frac{K}{\gamma}} v}{1 + \frac{K}{\gamma} v^2}.$$

Posons alors :

$$u = \sqrt{\frac{K}{\gamma}} v;$$

d'où

$$du = d\sqrt{\frac{K}{\gamma}} v$$

d'où également :

$$dt = -\frac{1}{K\gamma} \times \frac{du}{1+u^2}$$

l'intégration est facile, en prenant l'intégrale entre $\sqrt{\frac{K}{\gamma}} v_0$ et 0 on obtiendra le temps t_1 séparant le départ de la colonne liquide et le moment où l'amplitude est maximum :

$$t_1 = -\frac{1}{\sqrt{K\gamma}} \int_{\sqrt{\frac{K}{\gamma}} v_0}^0 \frac{du}{1+u^2} = -\frac{1}{\sqrt{K\gamma}} \left[\text{arc tg } \sqrt{\frac{K}{\gamma}} v \right]_{v=v_0}^{v=0} \quad (17)$$

il faut noter que cette méthode de calcul n'est valable que si, d'une part on suppose la masse constante, c'est-à-dire le recul faible par rapport à la longueur totale de la conduite et que, d'autre part, on suppose que la vitesse de l'eau est uniforme dans toute la conduite. Ces hypothèses ne peuvent être conformes à la réalité, la colonne liquide étant parcourue lors de son mouvement d'ensemble par une onde de pression, que si le temps de parcours de la colonne liquide par l'onde est négligeable par rapport au temps total de recul. Comme on peut s'en rendre compte facilement, cette condition se trouve remplie dans le cas qui nous intéresse. On a donc le droit d'écrire :

$$t_1 = -\frac{1}{\sqrt{K\gamma}} \text{arc tg } \sqrt{\frac{K}{\gamma}} v_0.$$

Les conditions aux limites imposent pour la constante d'intégration de la relation générale donnant le temps :

$$t = -\frac{1}{\sqrt{K\gamma}} \text{arc tg } \sqrt{\frac{K}{\gamma}} v + \text{cte.} \quad (18)$$

La valeur :

$$\text{Cte} = t_1 = \frac{1}{\sqrt{K\gamma}} \text{arc tg } \sqrt{\frac{K}{\gamma}} v_0.$$

La relation (18) donne, en remplaçant la constante par t_1 :

$$\sqrt{\frac{K}{\gamma}} v = \text{tg } \sqrt{K\gamma} (t_1 - t)$$

d'où :

$$v = \sqrt{\frac{\gamma}{K}} \text{tg } \sqrt{K\gamma} (t_1 - t)$$

mais, d'après la définition même de la vitesse, si x représente l'espace parcouru :

$$v = \frac{dx}{dt} = \sqrt{\frac{\gamma}{K}} \operatorname{tg} \sqrt{K\gamma} (t_1 - t)$$

d'où, en intégrant :

$$x = - \sqrt{\frac{\gamma}{K}} \times \frac{1}{\sqrt{K\gamma}} L \cos \sqrt{K\gamma} (t_1 - t)$$

$$x = \left[- \frac{1}{K} L \cos \sqrt{K\gamma} (t_1 - t) \right]_0'$$

l'élongation maximum sera obtenue pour $t = t_1$ et elle aura pour expression :

$$l = \left[- \frac{1}{K} L \cos \sqrt{K\gamma} (t_1 - t) \right]_0^{t_1} = \frac{1}{K} L \cos \sqrt{K\gamma} t_1$$

mais, puisque :

$$\operatorname{tg} \sqrt{K\gamma} t_1 = \sqrt{\frac{K}{\gamma}} v_0$$

on aura

$$\cos \sqrt{K\gamma} t_1 = \frac{1}{1 + \frac{K}{\gamma} v_0^2}$$

d'où

$$1 = \frac{1}{2K} L \left(1 + \frac{K}{\gamma} v_0^2 \right). \quad (19)$$

Pour la deuxième partie du mouvement, on a de même :

$$\frac{dv}{dt} = \gamma - Kv^2 = \left(1 - \frac{K}{\gamma} v^2 \right) = \gamma (1 - u^2)$$

en posant toujours :

$$u = \sqrt{\frac{K}{\gamma}} v, \quad dv = \sqrt{\frac{\gamma}{K}} du$$

donc

$$dt = \frac{1}{\sqrt{K\gamma}} \times \frac{du}{1 - u^2}$$

mais,

$$\frac{1}{1 - u^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1 - u} + \frac{1}{1 + u} \right)$$

on obtient, en intégrant

$$t = \frac{1}{2K\gamma} \int \frac{1+u}{1-u}.$$

Si nous posons maintenant :

$$t\sqrt{K\gamma} = \tau$$

nous aurons

$$\frac{1+u}{1-u} = e^{2\tau}$$

c'est-à-dire

$$1+u = (1-u)e^{2\tau}$$

d'où

$$u = \frac{e^{2\tau} - 1}{e^{2\tau} + 1} = \text{Th}\tau = \sqrt{\frac{K}{\gamma}} v. \quad (20)$$

L'espace parcouru au bout du temps $\tau = t\sqrt{K\gamma}$ sera :

$$x = \int_0^\tau v dt = \frac{1}{\sqrt{K\gamma}} \sqrt{\frac{\gamma}{K}} \text{Th}\tau d\tau = \frac{1}{K} \int_0^\tau \text{Th}\tau d\tau$$

mais l'élongation maximum $l_{\max}$, calculée précédemment, sera parcourue en sens inverse en un temps τ_2 tel que :

$$l_{\max} = \frac{1}{K} \int_0^{\tau_2} \text{Th}\tau d\tau = \frac{1}{K} LCh\tau_2$$

mais :

$$LCh\tau_2 = Kl = -L \cos \sqrt{K\gamma} t_1 = -L \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{K}{\gamma} v_0^2}}$$

donc :

$$Ch\tau_2 = \sqrt{1 + \frac{K}{\gamma} v_0^2}$$

mais en remplaçant τ_2 par sa valeur, on obtient :

$$Ch\sqrt{K\gamma} t_2 = \sqrt{1 + \frac{K}{\gamma} v_0^2} = \frac{1}{\cos \sqrt{K\gamma} t_1} = \sec \sqrt{K\gamma} t_1.$$

D'autre part, d'après la relation (20), nous avons :

$$u_2 = \text{Th}\tau_2 = \sqrt{1 - \frac{1}{Ch^2\tau_2}}$$

et comme :

$$K.l = L.Ch\tau_2 \qquad Ch^2\tau_2 = e^{2 Kl}$$

il s'ensuit :

$$u_2 = \sqrt{I \frac{I}{e^{2 Kl}}} = \sqrt{\frac{Kv_0^2}{\gamma + Kv_0^2}}$$

mais, comme nous l'avons vu :

$$u_2 = \sqrt{\frac{K}{\gamma}} v_2$$

donc :

$$v_2 = v_0 \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma + Kv_0^2}}.$$

Il existe donc une relation simple entre la vitesse de la colonne liquide au moment de son retour dans la section A de la vanne et la vitesse initiale v_0 .

Si on suppose que le choc de la colonne liquide sur l'extrémité A de la conduite est parfaitement élastique, c'est-à-dire que le recul suivant se fait avec une vitesse initiale égale à $-v_2$, à la fin de ce nouveau recul au moment du retour de la colonne liquide en A, la vitesse sera égale à

$$v_3 = v_2 \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma + Kv_2^2}}$$

et comme :

$$1 + \frac{K}{\gamma} v_2^2 = 1 + \frac{Kv_0^2}{\gamma + Kv_0^2} = \frac{\gamma + 2Kv_0^2}{\gamma + Kv_0^2}$$

il s'ensuit que :

$$v_3 = v_2 \sqrt{\frac{\gamma + Kv_0^2}{\gamma + 2Kv_0^2}} = v_0 \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma + 2Kv_0^2}}.$$

On aurait de même :

$$v_4 = v_3 \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma + Kv_3^2}} = v_0 \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma + 3Kv_0^2}}.$$

Nous avons donc réussi à montrer que pour le n^{ieme} recul, la formule de récurrence suivante sera valable

$$v_n = v_0 \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma + nKv_0^2}}.$$

Application numérique. — En appliquant les formules théoriques, ainsi obtenues au cas particulier qui nous intéresse, les résultats sont les suivants :

En prenant pour $v_0 = 430$ cm:sec.

$$\gamma = 1,14 \cdot 10^3 \text{ cm:sec:sec}$$

$$K = 4,18 \cdot 10^{-3}$$

L'application des formules précédentes donne :

$$t_1 = \frac{1}{4,770} \text{ arc tg } \sqrt{3,67 \cdot 10^{-6} \cdot 430}$$

$$t_1 = 0,458 \text{ arc tg } 0,824 = 0,458 \cdot 0,6894$$

$$t_1 = 0,315 \text{ seconde.}$$

Par ailleurs :

$$Ch \tau_2 = Ch \sqrt{4,77} \quad t_2 = 1 + \sqrt{3,67 \cdot 18,5 \cdot 10^{-2}}$$

$$Ch \ 2,1835 \quad t_2 = 1,295$$

d'où :

$$2,1855 \quad t_2 = 0,75$$

$$t_2 = 0,342$$

finalemeut

$$T = t_1 + t_2 = 0,657 \text{ sec}$$

alors que la méthode graphique a fourni pour ce chiffre :

$$T = 0,645$$

L'accord entre la théorie et les résultats de la méthode graphique est donc tout à fait remarquable.

Passons au calcul de la vitesse de la colonne liquide au moment de son premier retour ; nous avons :

$$v_2 = 430 \sqrt{\frac{1,14 \cdot 10^3}{1,14 \cdot 10^3 + 4,18 \cdot 10^{-3} \cdot 18,5 \cdot 10^4}}$$

$$v_2 = 430 \sqrt{\frac{1}{1 + 0,68}} = 0,775 \cdot 430$$

$$v_2 = 3,33 \text{ m/sec}$$

alors que la méthode graphique donnait :

$$v_2 = 3,70 \text{ m/sec}$$

L'accord n'est donc pas trop mauvais.

Calculons enfin l'amplitude maximum du recul de la colonne liquide dans le premier mouvement. Nous avons :

$$l = \frac{1}{2.4,18.10^3} L (1 + 3,67.18.5.10^4)$$

$$l = 1.195 \cdot L_e 1,68 = 0,62 \text{ m} .$$

On retrouve donc bien l'ordre de grandeur du recul constaté expérimentalement dans un tube de verre qui remplaçait un élément de conduite à proximité du robinet.

Ces résultats peuvent donc être considérés comme satisfaisants.

CHAPITRE VII

AUTRES UTILISATIONS DE LA MÉTHODE PIÉZO-ÉLECTRIQUE

1° *Application à l'étude de la pression artérielle chez l'homme*

La grande souplesse de la méthode piézo-électrique nous a permis d'aborder également l'étude de très faibles variations de pression.

Le Dr Gomez ayant insisté sur l'intérêt pratique que présenterait l'étude des courbes de variations de la pression artérielle chez l'homme, nous avons entrepris d'appliquer la méthode piézo-électrique à l'enregistrement de ces courbes. Le problème était très différent de celui qui avait été résolu pour l'étude des coups de bélier dans les canalisations d'eau.

Ici, en effet, l'amplitude des variations de la pression, étant seulement de l'ordre de 100 grammes par centimètre carré, les valeurs extrêmes de la pression artérielle, minima et maxima, correspondant normalement à 50 grammes et 300 grammes par centimètre carré, il fallait donc augmenter la sensibilité de l'appareil dans le rapport de 1.000 à 1.

Grâce aux progrès de la technique des lampes à trois électrodes, ce problème a pu être assez rapidement résolu. Avant de décrire le montage utilisé et les résultats obtenus, il ne sera pas inutile d'indiquer quelques-unes des raisons qui nous ont déterminés à considérer comme très intéressante l'application de la méthode piézo-électrique à l'étude de la pression artérielle, application dont l'utilité peut ne pas paraître évidente *a priori*.

Difficultés spéciales à l'étude de la pression artérielle. — En apparence, les variations de la pression artérielle peuvent paraître correspondre à de très basses fréquences, puisque la période du fondamental est de une seconde environ. En réalité, cette conception n'est pas du tout exacte, puisque certaines parties de la courbe correspondent à des variations brusques de pression et puisque en

général les courbes présentent un assez grand nombre de détails.

Par exemple, la courbe présente au début de la période (période de contraction du cœur) une montée rapide en pression, suivie d'accidents plus ou moins nombreux, introduisant des variations de pression souvent assez brutales.

Il était donc parfaitement logique d'utiliser, pour cette étude, une méthode permettant de suivre des variations rapides de pression. Par ailleurs, les dispositifs mécaniques utilisés jusqu'ici pour l'enregistrement de ces courbes, présentaient, outre l'inconvénient de leur basse fréquence propre qui a pour effet de déformer les courbes, le défaut d'introduire, du fait de leur fonctionnement même, un déplacement important qui a pour effet de transformer la grandeur qu'on veut étudier.

Par suite du déplacement l'enregistrement ne traduit plus les variations de pression elles-mêmes, mais une grandeur qui est fonction des variations de volume que l'artère éprouve sous l'influence des variations de pression. Ces variations de volume dépendent directement de l'élasticité de la paroi de l'artère et de son diamètre, diamètre qui est très variable d'un sujet à l'autre.

C'est ce qui explique que l'on n'ait pas réussi à tirer grand'chose de ce genre d'enregistrement alors qu'il devait en être tout autrement d'un enregistrement fidèle des variations de la pression sanguine. En effet, on conçoit facilement que l'ensemble formé par le cœur et le système artériel constitue un système hydraulique complexe, assimilable en première approximation à un circuit de distribution d'eau alimenté par une pompe. Au cours du fonctionnement de cet ensemble, il y aura nécessairement dans le circuit, des variations de vitesse d'écoulement du sang qui provoqueront des phénomènes hydrodynamiques comparables aux coups de bélier, dans les canalisations (variations de pression en aval d'un robinet, le circuit de canalisations se trouvant placé après le robinet). Ces variations de pression auront une forme et une amplitude liées directement à l'état physique du système artériel et aux dimensions géométriques de ses éléments.

Il est donc clair que la forme de la courbe de pression traduira d'une façon plus ou moins directe l'état physiologique du système circulatoire. Il sera donc indispensable, si l'on veut obtenir des renseignements précis sur l'état du système circulatoire d'un malade, de posséder comme base d'étude, une courbe fidèle des variations de sa pression artérielle.

Un premier essai d'application de la méthode piézo-électrique à l'étude de la pression artérielle des animaux avait été fait en collaboration avec MM. Bugnard et Gley. L'appareil était une réduction

de celui que nous avons utilisé pour les coups de bélier. On reliait l'appareil à l'artère par l'intermédiaire d'une canule à trois directions. L'inconvénient de cette façon de procéder était essentiellement la nécessité de sectionner l'artère ; outre les difficultés opératoires de toutes sortes que cela entraînait, le sectionnement de l'artère provoque nécessairement de grands troubles dans la circulation du sang de l'animal, ce qui modifie la pression même qu'on veut étudier. De plus l'introduction d'un bras mort entre la canule et l'appareil à quartz intervient, comme nous l'avons montré, pour modifier également le phénomène enregistré.

Piézographe. — Pour surmonter ces difficultés et chercher à obtenir un appareil qui permette d'enregistrer les variations réelles de la pression artérielle chez l'homme, nous avons, en collaboration avec le Dr Gomez, modifié la méthode de la façon suivante :

On ne sectionne plus l'artère, mais la lame de quartz de Curie utilisée pour cette mesure est mise en relation avec l'artère par l'intermédiaire d'un patin rigide de petites dimensions faisant corps avec la lame de quartz, le diamètre du patin étant plus faible que celui de l'artère dans laquelle on veut mesurer la pression. Le patin P étant amené au-dessus du vaisseau A où règne la pression, il suffit alors de l'appliquer légèrement pour obtenir une transmission convenable de la pression (voir les

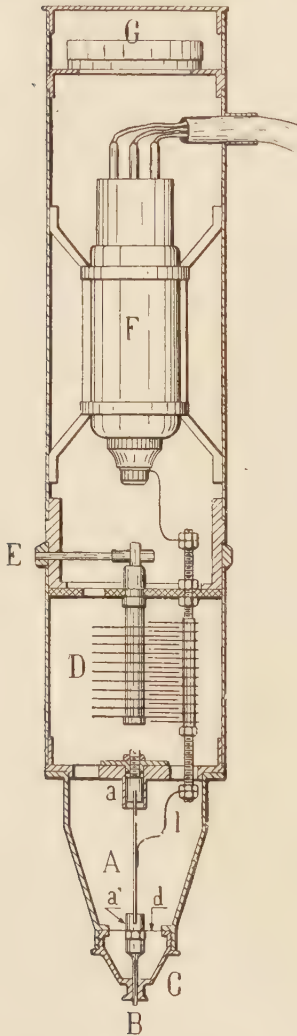


FIG. 51

Coupe et montage électrique interne du piézographe.

A, Lame de quartz ; B, Patin ; C, Anneau de garde ; D, Condensateur variable ; E, Bague de commande du condensateur ; F, Triode électromètre.

schémas fig. 51 et 52). Étant donnée la grande rigidité de cet ensemble, les tissus interposés n'introduisent aucune déformation quelque peu visible. Nous avons vérifié qu'en interposant des épaisseurs variables de muscles, la courbe enregistrée n'était pas modifiée. Pour éviter les réactions élastiques des tissus environnants et l'intervention des réactions possibles du sujet, on dispose autour du patin une pièce rigide qui sert d'anneau de garde contre les efforts parasites. L'appareil ainsi réalisé a été construit et porte le nom de *piézographe*, pour le distinguer des appareils mécaniques antérieurement existants. Les quantités d'électricité obtenues par l'action de la pression sont, comme dans l'étude des coups de bélier, amplifiées et ensuite enregistrées à l'aide d'un oscillographe (voir l'ensemble de l'appareil, fig. 53).

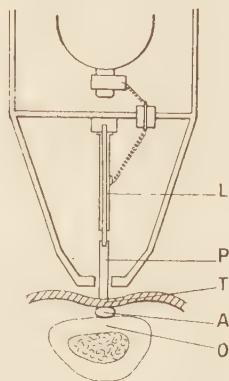


FIG. 52. — Mise en place du patin du piézographe sur l'artère.

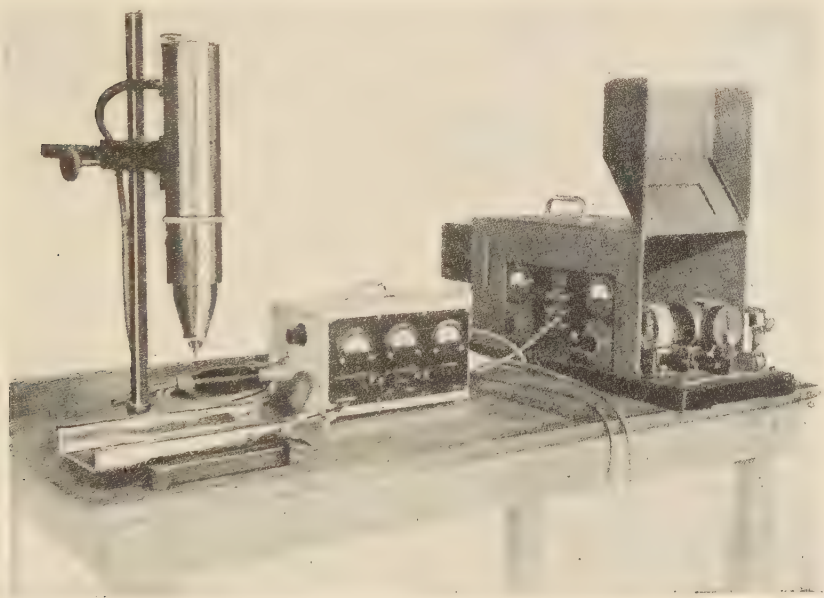


FIG. 53. — Vue d'ensemble de l'appareil prêt pour l'enregistrement de la tension artérielle

Résultats obtenus. — Alors qu'on n'avait réussi à obtenir aucun résultat appréciable par l'interprétation des courbes de variation de volume déformées, données par les appareils mécaniques, les tracés obtenus avec le piézographe ont permis, non seulement de déceler des anomalies pathologiques diverses du système circulatoire, mais encore la localisation des affections du système circulatoire.

En particulier l'examen rationnel de la forme des courbes a permis de réaliser une classification des hypertensions suivant la

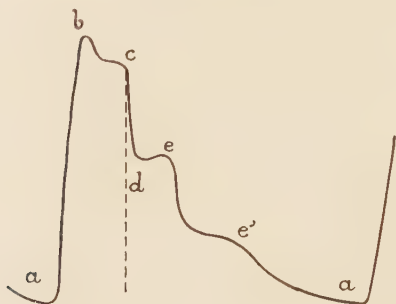


FIG. 54

Forme de la courbe de pression artérielle chez l'homme

localisation de l'affection qui est à l'origine. Enfin, la lecture de ces tracés a servi de base au Dr Gomez pour l'étude théorique et expérimentale des lois de l'hémodynamique chez l'homme.

Allure des courbes de pression et interprétation des courbes. — La courbe obtenue chez l'homme, appelée piézogramme, se décompose en plusieurs parties (voir fig. 54). Tous les tracés, quelle que soit leur

forme particulière, présentent d'abord une ascension rapide *ab* suivant une courbe assimilable à une droite. Cette ligne présente rarement une légère inflexion sur son trajet. Ils accusent ensuite une faible modification de la pression représentée par la ligne *bc* qui peut être ascendante ou descendante, puis une courbe décroissante *ac* suivie d'une surpression *e* et d'une décroissance relativement lente interrompue çà et là quelquefois par une et même deux ondes de surpression secondaire *e'* de très faible amplitude.

Les expériences de Gomez sur un système circulatoire artificiel et schématique ont montré : 1° que la partie *abc* correspondait à la période de contraction du ventricule ou période de remplissage des artères; 2° que la partie *cde e' a* correspondait au contraire à l'arrêt de l'afflux sanguin dans les artères, période au cours de laquelle la pression décroît jusqu'à une nouvelle pulsation et qui correspond à la période de diastole du cœur.

*Interprétation de la partie décroissante de la courbe (partie *cdee' a*).*
Loi de décroissance de la pression artérielle en fonction du temps. — Après avoir enregistré un grand nombre de piézogrammes, le

Dr Gomez est arrivé à montrer que la décroissance de la pression artérielle chez l'homme en période de diastole, s'effectue suivant une loi physique générale et simple. Lorsque, sur un piézogramme humain on détermine, en faisant abstraction des accidents e et e' et en partant du point c , les valeurs successives p_0, p_1, p_2 , etc. de la pression p , aux époques t_0, t_1, t_2, t_3 correspondants à des intervalles de temps égaux entre eux, on peut constater, en prenant les logarithmes des valeurs successives de la pression, que celle-ci décroît suivant une loi exponentielle du temps de la forme :

$$P = St + p_0 \cdot e^{-\theta t}$$

θ et St étant des constantes caractéristiques du système circulatoire étudié. P représente la pression mesurée à partir de la pression atmosphérique, St représente l'ordonnée de l'asymptote de la courbe de décroissance de la pression θ l'exposant de l'exponentielle.

Si nous désignons par p la différence $P - St$, il en découle la relation :

$$\theta = -\log \frac{p_0}{p} \text{ avec } p = P - St.$$

C'est donc la valeur particulière de ce paramètre θ qui caractérisera la loi de décroissance de la pression dans un système circulatoire déterminé, paramètre qui est variable suivant l'état du système circulatoire.

Étude du paramètre θ . — Si nous assimilons maintenant le système circulatoire humain à un système de canalisations élastiques horizontales prolongées par un réseau capillaire, si nous désignons

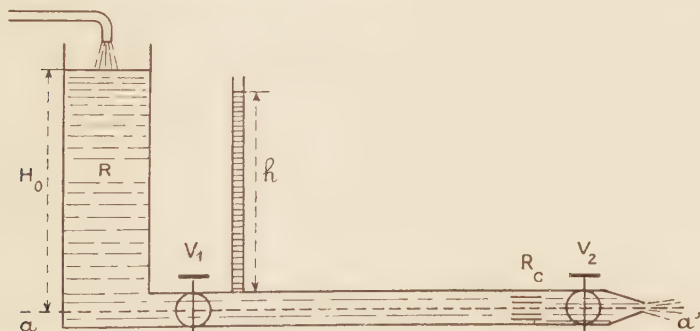


FIG. 55. — Représentation schématique du système circulatoire humain

V_1 = Vanne remplaçant les valvules aortiques ;
 R_c = Réseau capillaire.

par dV le volume de liquide qui s'écoule pendant le temps dt qui suit la fermeture de la vanne V_1 (voir fig. 55) et par Q le débit, la loi de l'écoulement, après la fermeture de V_1 sera :

$$-dV = Q dt. \quad (1)$$

D'autre part, la variation de volume de la canalisation élastique sera liée à la variation de pression $d\rho$ correspondante, par la relation :

$$dV = \frac{2 \pi R^3 L d\rho}{E e} \quad (2)$$

$RL e$ représentant le rayon, la longueur et l'épaisseur de la conduite tandis que E représente le module d'Young de la paroi. En tenant compte de la présence du capillaire au bout de la conduite et en négligeant les pertes de charge dans la partie principale de la conduite, la loi de Poiseuille impose la relation

$$Q = \rho \times \frac{\pi}{8 \eta} \sum \frac{r^4}{l}$$

l = longueur des capillaires, r = rayon des capillaires, η = coefficient de Poiseuille.

En posant :

$$\frac{2 \pi R^3 L}{E e} = \alpha = \text{coefficient de déformabilité élastique des artères,}$$

et :

$$\frac{\pi}{8 \eta} \sum \frac{r^4}{l} = \frac{Q}{\rho} = \omega = \text{coefficient de conductance capillaire,}$$

$\frac{l}{\omega}$ représentant alors la résistance R_c à l'écoulement du système capillaire, les formules précédentes se simplifient :

$$\left\{ \begin{array}{l} -dV = Q dt \\ dV = \alpha d\rho \end{array} \right. \quad (3)$$

$$Q = \omega \rho \quad (4)$$

L'on en tire :

$$dt = -\frac{dV}{Q} = -\frac{\alpha d\rho}{\omega \rho}$$

d'où, en intégrant :

$$t = -\frac{\alpha}{\omega} \log \frac{\rho}{\rho_0}$$

enfin :

$$p = p_0 e^{-t \frac{\omega}{\alpha}}$$

et en posant :

$$\frac{\omega}{\alpha} = \theta \quad (5)$$

les formules précédentes permettent de retrouver par la théorie la relation donnée par l'expérience :

$$p = p_0 e^{-\theta t}$$

et donnent également : $Q = p\omega = p\theta\alpha$.

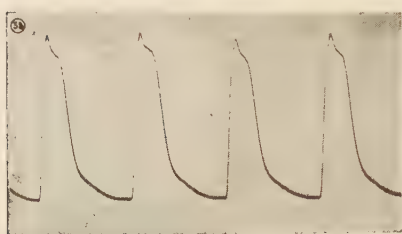
Le paramètre θ caractérisant la décroissance de la pression dans le système artériel sera directement proportionnel au coefficient de conductance capillaire ω et inversement proportionnel au coefficient de déformabilité élastique des artères α . Enfin le produit $p\theta$ est proportionnel au débit, donc à la vitesse d'écoulement du sang dans les artères. On voit donc toute l'importance pratique de la détermination de ce paramètre θ .

b) *Renseignements que l'on peut tirer immédiatement de la détermination expérimentale de θ sur les piézogrammes.* — En considérant la formule (5), on peut voir que si les caractéristiques des artères principales restent immuables, ou plus précisément, si le coefficient α demeure constant d'un sujet à l'autre, le taux de décroissance est uniquement fonction du degré de conductance du réseau capillaire. Le paramètre θ sera alors d'autant plus grand que le coefficient de conductance capillaire ω est plus important, c'est-à-dire d'autant plus grand que la résistance totale R_c qui s'oppose à l'écoulement sera plus petite. S'il en est ainsi — et nous indiquerons plus loin les raisons qui militent en faveur de cette hypothèse, la connaissance du coefficient θ permet d'apprécier directement le rayon moyen du système capillaire présent dans la partie intéressée du système circulatoire.

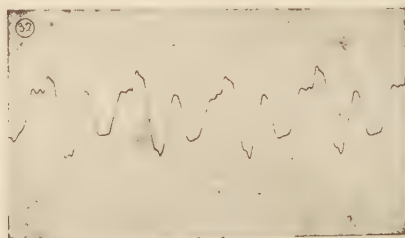
La mesure de θ sur les piézogrammes permettra donc de déceler toute anomalie du système capillaire, donc de localiser une des causes d'hypertension possibles ; sclérose ou rétrécissement des capillaires, et, également, la cause d'une hypotension : dilatation exagérée des capillaires ou plus exactement état physiologique équivalent à une dilatation exagérée des capillaires.

En fait, sur les tracés, des différences très nettes sont visibles sur la valeur de θ ; on peut nettement différencier les tracés où la

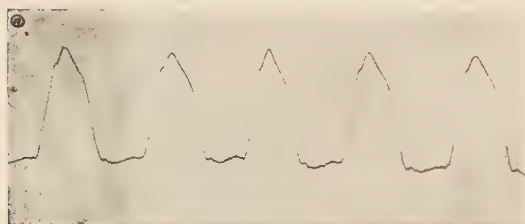
valeur de 0 peut être considérée comme normale ; et ceux de ce même coefficient est nettement différent. Cette différence correspondant à un état pathologique bien caractérisé. (Voir des exemples sur les tracés donnés, fig. 56 et 57.)



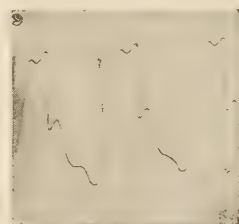
Insuffisance
des sigmoïdes aortiques et aortite



Pouls veineux
(Jugulaire)



Choc de la pointe du cœur
dans le cas de sténose mitrale



Aortite
sans hypertension

FIG. 56

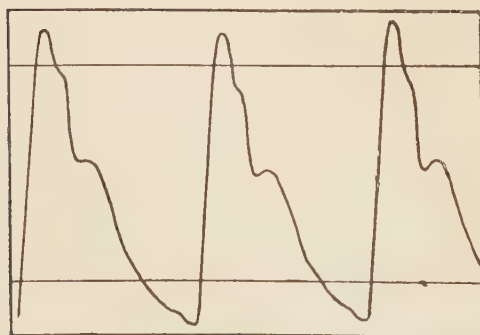


FIG. 57
Piézogramme huméral
physiologique

Étude de la limite statique de la pression artérielle ou pression virtuelle statique. — Comme nous l'avons vu pendant le cours de la partie décroissante de la pression artérielle, la pression décroît suivant une loi exponentielle du temps jusqu'à la pulsation suivante. En supposant que cette der-

nière et les autres qui doivent suivre n'aient pas lieu, la pression continuerait à décroître jusqu'à une valeur fixe St limite statique vers laquelle la pression tend asymptotiquement. Cette valeur limite de la pression est normalement chez l'homme de l'ordre de 6 à 7 cm de mercure, donc très au-dessus de la pression atmosphérique.

Cette valeur statique, qui n'est jamais atteinte pratiquement dans le fonctionnement normal du système circulatoire de l'homme, peut être mesurée expérimentalement à condition de supprimer un nouvel afflux de sang, il suffit de comprimer l'artère intéressée en amont du point où on fait la mesure (artère humérale généralement) en ayant soin de ne pas gêner la circulation veineuse du retour. On peut donc ainsi déterminer sa valeur dans chaque cas particulier. Le Dr Gomez, ayant constaté que cette pression statique était toujours très supérieure à la pression atmosphérique, a été conduit à conclure à l'existence d'une force tendant à contracter l'artère et venant, soit des tissus environnants, soit, beaucoup plus certainement, de la contractibilité des artères musclées, cette contractibilité ayant un effet régulateur possible sur le débit artériel, effet régulateur qui a lieu principalement dans les artères de moyen et de fin calibres. La valeur de la pression virtuelle statique serait alors en liaison directe avec la contractilité plus ou moins grande des artères ou artérioles. Le Dr Gomez en a d'ailleurs eu une confirmation expérimentale, en injectant à des malades, des sels dérivés de la choline qui produisent une vaso-dilatation importante, la pression virtuelle statique se trouve considérablement abaissée. Une hypocontractilité de ces vaisseaux diminue donc la pression St et de ce fait abaisse la valeur moyenne de la pression artérielle, alors qu'une hypercontractilité élève la valeur de cette pression St en provoquant une augmentation de la valeur moyenne de la pression artérielle. L'élévation de St provoquera donc une hypertension chez le malade, alors que sa diminution provoquera une hypotension. On a donc ainsi mis en évidence une deuxième série de causes possibles d'hyper ou d'hypotension. Cette nouvelle cause d'hypertension est entièrement distincte et sans liaison avec une anomalie du coefficient θ de décroissance de la pression.

Conclusion

L'interprétation des courbes de pression artérielle enregistrées à l'aide du quartz piézo-électrique, a immédiatement permis de

scinder en plusieurs groupes les causes d'hypertension, suivant la localisation de l'affection qui en est la cause, affection que l'on doit soigner avec des méthodes thérapeutiques différentes. Ces premiers résultats ne sont, malgré tout, que de faible importance relative, car l'interprétation des courbes a permis encore au Dr Gomez (38) à l'aide des paramètres nouveaux qui s'en dégagent, de faire l'étude complète des lois physiques de l'hémodynamique ; étude dont toutes les conséquences cliniques sont loin d'avoir été dégagées, mais dont la voie est actuellement ouverte.

II. — *Application à l'étude de la valeur absolue des pressions atteintes par les gaz de combustion des poudres*

L'utilisation des propriétés piézo-électriques d'une lame de quartz constitue sans aucun doute la méthode de choix pour l'étude des lois de variation de pression des gaz de combustion des poudres ou mélanges explosifs gazeux, car il s'agit alors de pressions très rapidement variables. La pression maximum est alors atteinte au bout d'un temps de l'ordre de quelques millièmes de seconde et les pressions à enregistrer peuvent atteindre couramment quelques milliers de kilos par centimètre carré. Il suffit alors de réaliser un appareil environ dix fois moins sensible que celui qui avait été utilisé pour l'étude des coups de bélier. Le montage utilisé comporte une triode-électromètre (voir le schéma fig. 18).

Réalisation de l'appareil.

a) *Support du quartz et dispositif de transmission de la pression.* — Dans ce cas il est commode, étant donnée l'importance des efforts mis en jeu, de remplacer la lame de quartz de Curie par deux lames de quartz accolées, montées avec leurs axes électriques opposés (lames taillées perpendiculairement à l'axe électrique et découpées en forme de cylindre). L'armature métallique isolée se trouvant placée entre les deux quartz, son isolement est assuré par les lames de quartz elles-mêmes (fig. 58).

La pression est transmise directement aux quartz par un piston cylindrique coulissant, de section connue avec précision (section de 0,5, 1, 2 ou 3 centimètres carrés suivant la valeur maxima de la pression à étudier).

Les quartz sont placés dans une enceinte métallique fermée (voir fig. 58). Ils sont serrés entre le piston et une pièce métallique

filetée portant un logement spécial pour les quartz. Cette dernière pièce est munie d'un roulement à billes pour éviter des efforts exagérés sur la connexion au moment du serrage des quartz lors de leur mise en place. Le serrage initial a pour but d'éviter un déplacement appréciable du piston au moment où s'applique la pression. Normalement, les déformations des quartz et des pièces les supportant peuvent, à juste titre même dans les cas de pression très élevée, être considérées comme négligeables.

Un tube desséchant contenant de l'anhydride phosphorique, est

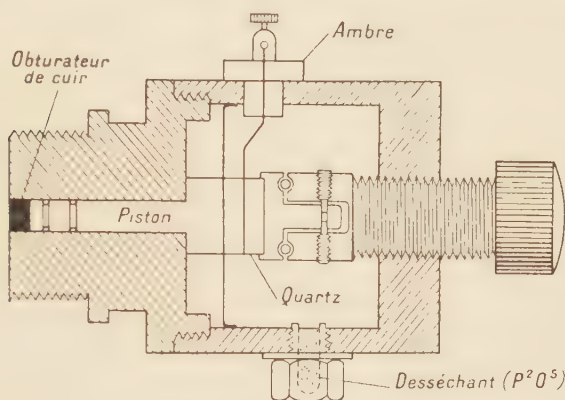


FIG. 58. — Dispositif de transmission de l'effort aux quartz et support des quartz

prévu pour supprimer la conductibilité électrique du quartz en surface, conductibilité due à la présence d'humidité.

b) *Oscillographe employé et enregistreur photographique.* — L'oscillographe utilisé est constitué, suivant la rapidité des variations de pression, soit par un oscillographe électromagnétique Dubois de période propre 1/3.000 de seconde (période propre la plus courte qui ait pu être réalisée dans ce genre d'appareil), soit par un oscillographe cathodique. Dans les deux cas, l'enregistrement se fait sur un tambour tournant cylindrique, dont la vitesse de déroulement linéaire est mesurée avec précision à l'aide d'une fréquencesmètre à lame vibrante ou d'un entraînement par moteur synchrone.

c) *Tarage en pression et contrôle de l'amplificateur.* — Cet étalonnage en valeur absolue des pressions est fait avant et après chaque détermination, à l'aide d'une presse à huile spéciale permettant d'aller jusqu'à 3.000 kilos par centimètre carré. En plus

FIG. 59. — Exemple d'enregistrement des variations de la pression des gaz de combustion de matières explosives

de cet étalonnage, on peut contrôler à tout moment les caractéristiques électriques du montage en appliquant une tension fixe et constante à l'entrée de l'amplificateur, par exemple, une batterie d'accumulateurs ne débitant pas et en notant la déviation indiquée par un milliampèremètre de précision, mis en série avec l'oscillographe Dubois, ou par un voltmètre électrostatique Ferranti monté en parallèle avec l'oscillographe cathodique utilisé.

Résultats obtenus. — Un tel montage nous a permis d'obtenir d'excellents tracés dont on peut voir un exemple figure 59, qui reproduit une de nos courbes de pression à l'échelle $\frac{1}{3}$.

Les tracés ainsi obtenus permettent d'étudier ensuite de façon précise les lois qui régissent la combustion des explosifs solides ou des mélanges explosifs gazeux.

III. — *Application à l'étude des problèmes concernant les chemins de fer*

En collaboration avec M. Mauzin (39) inspecteur divisionnaire à la S. N. C. F., j'ai appliqué la méthode piézo-électrique aux problèmes concernant les chemins de fer. Parmi ceux-ci, les plus importants sont l'étude des efforts latéraux exercés en marche, aux différentes vitesses, par les essieux des wagons ou des locomotives sur les rails, l'étude des diagrammes de pression dans les cylindres de locomotives à vapeur aux régimes correspondant à la marche normale des convois, l'étude

des efforts exercés sur le crochet de traction d'un wagon, etc.

a) *Étude des efforts latéraux des essieux sur les rails.* — Ce problème était l'un des plus importants de tous ceux qui se posent dans le domaine des chemins de fer, étant donnée la nécessité pour le réseau d'augmenter la vitesse moyenne des convois, afin de faire

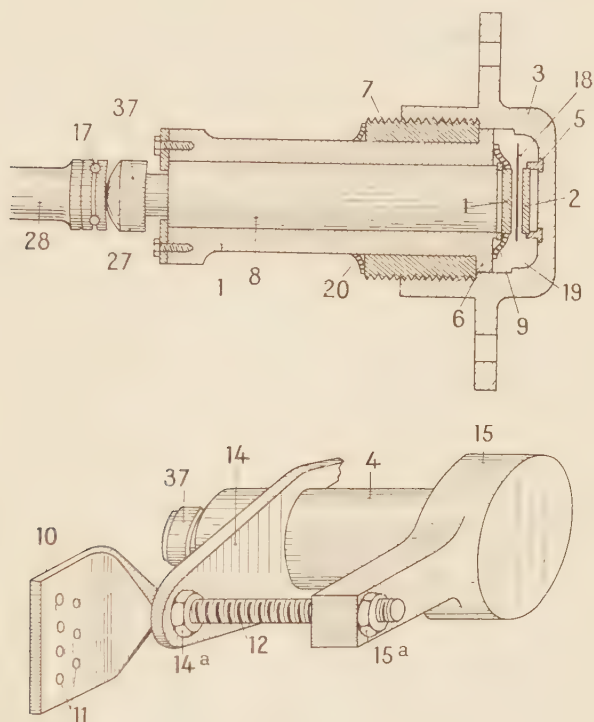


FIG. 60

Dispositif utilisé pour l'étude des efforts latéraux des essieux sur les rails

face à la concurrence routière. L'augmentation de cette vitesse moyenne risquait de produire de graves catastrophes si l'on n'étudiait pas la loi de variation des efforts maxima s'exerçant en un point défectueux de la voie, en fonction de la vitesse du véhicule, en cherchant ensuite à diminuer l'amplitude de ces efforts.

M. Mauzin, dont l'activité remarquable s'était déjà exercée avec succès pour résoudre des problèmes analogues, est venu nous demander notre collaboration pour résoudre ce problème par l'application de la méthode piézo-électrique.

Dispositif utilisé. — Le montage utilisé est le suivant : deux lames de quartz cylindriques 1 et 2 de 60 mm de diamètre, sont montées comme précédemment avec électrode isolée entre les deux lames à l'intérieur d'une culasse (3), prolongée en avant par un cylindre creux (4) dont l'axe est confondu avec celui des lames de quartz. L'ensemble de la culasse et du cylindre est maintenu en place au moyen d'un bâti rigide (fig. 60) fixé au châssis du boggie de telle sorte que l'axe du cylindre soit approximativement dans le prolongement de l'axe de l'essieu. Dans le cylindre, réalisé aussi long que possible, dans les limites du gabarit, glisse un piston (8) servant

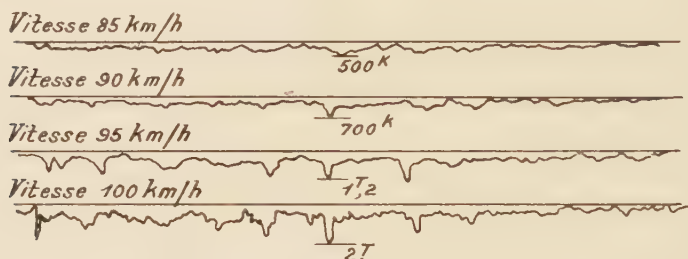


FIG. 61. — Variations de l'effort exercé sur le rail par un essieu de voiture à bogie en fonction de la vitesse de circulation dans une courbe de 500 mètres de rayon

à la transmission de l'effort. D'autre part, un roulement à butée (17) est fixé au bout de l'essieu. Le roulement à butée, au cours du mouvement de lacet de l'essieu, vient prendre appui sur le piston du quartz qui limite le jeu de l'essieu, remplit le rôle normal des joues de boîtes d'essieux et transmet l'effort aux lames de quartz. Au point de vue électrique, le montage est tout à fait analogue à ceux qui ont été précédemment décrits. Toutefois, à cause de l'importance considérable des efforts à étudier, dont la valeur peut atteindre 10 et même 15 tonnes, les lames de quartz peuvent être shuntées par une capacité de valeur très importante (valeur qui peut atteindre plusieurs centièmes de microfarad), ce qui permet d'augmenter la tenue des charges électriques (pratiquement plusieurs heures) par suite de l'augmentation de la constante de temps CR du circuit grille de la triode électromètre.

Une source de difficultés réside dans le fait que le montage est, en marche, soumis à des trépidations considérables, ce qui oblige à réaliser une suspension élastique convenable de la triode-électro-

mètre, cette lampe ne pouvant être reportée très loin des quartz par suite des difficultés d'isolement électrique qui seraient ainsi augmentées.

Résultats obtenus. — Le dispositif ainsi réalisé a permis grâce à son excellente tenue des charges, un enregistrement continu des efforts latéraux des essieux sur les rails dans un convoi en marche entre Paris et Toulouse, et de repérer ainsi avec précision les points où la voie en mauvais état donnait lieu à des efforts latéraux exagérés. En ces points, on a pu étudier ensuite les variations de l'amplitude de la pointe d'effort provoquée par le défaut, en fonction de la vitesse du convoi.

Les résultats donnés par la figure 61, montrent que l'amplitude varie suivant une loi exponentielle de la vitesse, au moins dans le domaine des vitesses réalisées, ce qu'on peut vérifier en traçant la droite logarithmique (fig. 62). Si on extrapole légèrement la courbe on arrive ainsi à prévoir que l'effort qui n'est que de 2 tonnes à 100 kilomètres à l'heure serait de 12 tonnes à 120 kilomètres à l'heure, hypothèse qui est confirmée par l'expérience. On voit donc

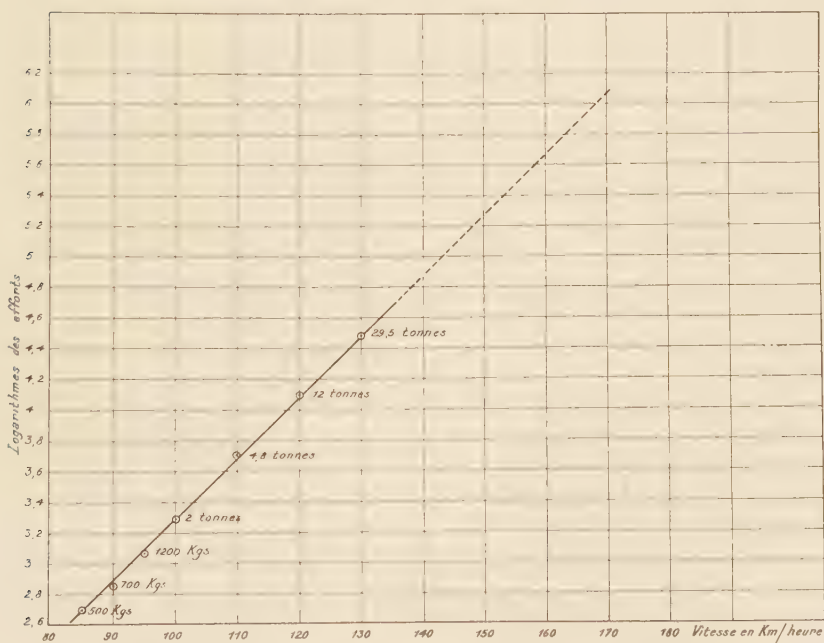


FIG. 62. — Courbe du logarithme de l'effort en fonction de la vitesse de circulation

que la localisation des défauts qui n'a qu'assez peu d'importance aux faibles vitesses, devient tout à fait essentielle aux vitesses plus élevées si l'on veut éviter les déraillements.

L'étude des lois de variation de ces efforts a permis à M. Mauzin de perfectionner le matériel roulant, en modifiant en particulier les

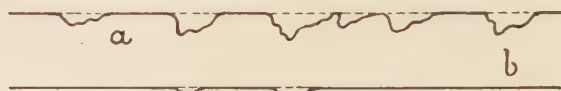


FIG. 63. — Enregistrements relevés
avec l'appareil piézoélectrique

- a) Effort latéral exercé sur le rail par le premier essieu d'une machine ;
- b) Effort exercé au même point de la voie après modification de la machine.

attelages entre boggies ; modification qui a permis de réduire considérablement les efforts latéraux pour une même vitesse de marche (fig. 63).

Je n'indique ici qu'un des résultats que la méthode a permis d'obtenir dans ce domaine ; mais il est évident que là encore, l'utilisation du quartz peut encore rendre d'autres services.

BIBLIOGRAPHIE

1. LABARTHE. Nouvelles méthodes de mesures mécaniques. *Publications scientifiques du ministère de l'Air*, fasc. 96, 1936.
2. *Compte rendu des recherches du Comité Scientifique des Poudres*. Travaux effectués au Laboratoire de M. le P^r LANGEVIN, années 1935 et 1936.
3. J. J. THOMSON. *Engineering*, 107 (1919), p. 543-544.
4. A. KEYS. *Journ. of the Franklin Institute*, nov. 1923, p. 577, vol. 196.
5. J. C. KARCHER. *Scient. papers of Bureau of Standards*, août 1923, p. 257, vol. 18.
6. M. CHALVET. La piézo-électricité. *Mémorial de l'Artillerie française*, t. X, 4^e fasc., 1931, p. 1000.
7. A. LANGEVIN, MURAOUR et AUNIS. Étude des méthodes de mesure des pressions explosives. Comparaison crusher-quartz piézo-électrique. *J. de Phys.*, t. VII, nov. 1936, n^o 11, p. 448.
8. HOCARD. Enregistrement oscillographique des variations instantanées de pression dans les canalisations d'eau. Diplôme d'études supérieures, Faculté des Sciences de Paris. *J. de Phys.*, t. IX, p. 95 (1928).
9. A. LANGEVIN et M. BOULLE. *Compte rendu des travaux de l'Union technique du Bâtiment et des Travaux publics*, p. 81, 1928.
10. J. KLUGE et LINCKH. Piezoelectrische Messungen von Druck und Beschleunigungs Kräften. *V. D. I.*, 14 sept. 1929, t. LXXIII, n^o 37, p. 1311 ; Piezoelectrischer Indikator für Schnellaufende Verbrennungs motoren. *V. D. I.*, 21 juin 1930, t. LXXIV, n^o 25, p. 887.
11. D^r D. M. GOMEZ et A. LANGEVIN. Sur l'utilisation du quartz pour l'étude de la pression du sang dans les vaisseaux. *C. R. T.*, 199, p. 890, 1934 ; La piézographie directe et instantanée. *Actualités scientifiques et industrielles*, n^o 512, 1937. Hermann & Cie, Paris.

12. L. BUGNARD, P. GLEY et A. LANGEVIN. Inscription et mesure de la pression sanguine. *C. R. T.*, 196, p. 293, 1933.
13. A. MAUZIN. Mesure des efforts latéraux des véhicules sur le rail. *Revue générale des chemins de fer*, mars 1934.
14. H. GONDET et P. BEAUDOUIN. Les manographes et accélérographes piézo-électriques. *Génie Civil*, 19 et 26 décembre 1936.
15. P. CURIE (Œuvres de P. Curie, Gauthier-Villars, Paris, 1908). *C. R. Académie des Sciences*, t. 92, p. 186 et 350 ; t. 93, p. 204 et 1137 ; t. 95, p. 914 ; t. 96, p. 1287 ; t. 121, p. 1059 et 1117 ; *Journal de Physique*, 1882, p. 245 ; *Ann. de Ch. et Phys.*, t. 17, 1889.
16. VOIGT. Piézo et pyroélectricité. *Ann. der Phys.*, t. 55, p. 701, 1895 ; id. *Kristallphysik*. Teubner, éditeur, Leipzig, 1928.
17. DANIELL. *Journal of Science and Arts*, 1816.
18. DESCLOIZEAUX. *Annales de Chimie et Physique*, t. 45, p. 129, 1855.
19. ARSANDAUX. *Bull. de la Sc. franç. de Minéralogie*, t. 51, p. 166, 1928.
20. LE CHATELIER. *La Silice et les Silicates*. Hermann, Paris, 1914.
21. K. ONNES et A. BECKMANN. *Leiden Communication*, 1912, 132 f.
22. A. PERRIER. *Zeits. Phys.*, 58. 805 (1922).
23. DAWSON. Piézo-électricité du quartz. *Physic. Rev.*, t. 29, p. 532 (1927).
24. PITT et MAC KINLEY. Variation avec la température de l'effet piézo-électrique du quartz. *Canadian Journal of Research*. Sec. A, vol. 14, p. 57, mars 1936.
25. KLEY et KAPER. *Physica IV*, 4, 311, 1937.
26. ANDREIEFF, FREEDERICKSZ et KASARNOWSKY. *Zeits. f. Physik*, t. 54, p. 477, 1929.
27. FREEDERICKSZ et MICHAILOW. *Zeits. für Physik*, t. 76, p. 328, 1932.
28. P. VIGOUREUX. *Phil. Mag.*, 6, p. 1140, 1927.
29. I. KOBAREW. *Zeits. der Phys. Ges. USSR.*, 6, H. 2, 1929.
30. A. LANGEVIN. *Journal de Physique*, t. 7, p. 95, 1936.
31. R. RADMANECHE. Influence de la température sur la conductibilité électrique du quartz, compte rendu, t. 201, p. 448, 1935.
32. J. VILLEY. *Journ. de Physique*, t. VIII, 410, 1927.

33. L. BERGERON. Étude des variations de régime dans les conduites d'eau. Solution graphique générale. *Revue générale de l'hydraulique*, nos 1 et 2, janvier 1935 à avril 1935 ; Étude des coups de bélier dans les conduites. *La Technique moderne*, t. XXVIII, nos 2 et 3, janvier et février 1936.
34. ALLIEVI. Théorie du coup de bélier. *Revue de Mécanique*, 1904 et Dunod, Paris.
35. JOUKOWSKY. *Ueber den hydraulischen Stoss in Wasserleitungen*. Saint-Petersbourg, 1898.
36. RATEAU. *Compte rendu du II^e Congrès de la Houille blanche*. Dunod, 1917.
37. CAMICHEL, EYDOUX et GARIEL. *Étude théorique et expérimentale des coups de bélier*. Dunod, 1919.
38. D. GOMEZ. *Hémodynamique*. Hermann & Cie, 1941.
39. A. MAUZIN et A. LANGEVIN. *Appareil permettant notamment de mesurer les efforts qui se développent entre les essieux et les châssis des véhicules de chemins de fer*. Brevet français n° 350.964, 26 avril 1933.
40. M. O. SCHNYDER. Méthode graphique. *Wasserkraft und Wasserwirtschaft*, nos 5 à 6, année 1932, n° 12, année 1935.
41. Abbé GAUDEFROY. *Bulletin de la Soc. franç. de Minéralogie*, t. 54, p. 108, année 1931.
42. P. LANGEVIN. *Procédés et appareils pour la production de signaux sous-marins dirigés et pour la localisation à distance d'obstacles sous-marins*. Brevet français n° 502.913, 29 mai 1916.
43. N. G. RAHIMI. Contribution à l'étude de la conductibilité électrique et de la constante diélectrique du quartz, de la fluorine, du sel gemme, de la barytine et du gypse. *Thèse*, juillet 1937, Jouve & Cie, 15, rue Racine, Paris.

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

L'OPTIQUE DES ÉLECTRONS

Vu et approuvé :

Paris, le 19 mars 1941.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,
CH. MAURAIN.

Vu et permis d'imprimer :

Le Doyen de la Faculté des Sciences,
chargé des fonctions de Recteur de l'Académie de Paris,
CH. MAURAIN.

Imprimerie des Presses Universitaires de France. — Vendôme (France)
